

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інженерно-хімічний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматизації хімічних виробництв

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК 66.096.5

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

А.І.Жученко
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ 18 ” травня 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології

(код і назва)

на тему: Моделювання та оптимальне керування процесами зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі

Виконала: студентка 6 курсу, групи ЛА-61м

Борзенкова Світлана Володимирівна
(прізвище, ім’я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник к.т.н., доцент Ладієва Леся Ростиславівна
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інженерно-хімічний факультет

(повна назва)

Кафедра автоматизації хімічних виробництв

(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 151- Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ А.І.Жученко
(підпис) (ініціали, прізвище)

« 26 » березня 2018 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Борзенковій Світлані Володимирівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Моделювання та оптимальне керування процесами зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі,
науковий керівник дисертації: к.т.н., доцент Ладієва Леся Ростиславівна,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 21 » березня 2018 р.
№ 979-с

2. Термін подання студентом дисертації « 16 » травня 2018 р.

3. Об'єкт дослідження: технологічний процес зневоднення та гранулювання в грануляторі псевдозрідженого шару

4. Предмет дослідження: математична модель процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі, експертна система для діагностування аварійних ситуацій в технологічному процесі, система керування режимом перемішування у псевдозрідженому шарі

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Аналіз технологічного процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. 2. Створення експертної системи діагностування аварійних ситуацій. 3. Дослідження гранулятора псевдозрідженого шару як ТОК. 4. Математичне моделювання гранулятора. 5. Розробка системи керування режимом перемішування у псевдозрідженому шарі.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: візуалізовані результати досліджень математичної моделі процесу зневоднення та гранулювання, зображення вікон використаних програм, PowerPoint-слайди для представлення напрацювань магістерської дисертації.

7. Орієнтовний перелік публікацій

- Борзенкова С. В. Система автоматичного керування гранулятором псевдозрідженого шару (НУХТ – 2016): матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (23 листопада 2016 р.) [Електронний ресурс] / Борзенкова С. В., Ладієва Л. Р. – К: НУХТ, 2016 р. – 287 с. — Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>

- Борзенкова С. В. Методи оптимізації роботи гранулятора (АКІТ-2017): матеріали Четвертої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (19–20 квітня 2017 р., м. Київ)/ Борзенкова С. В., Ладієва Л. Р. – К.: НТУУ «КПІ», 2017 р. – 204 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – 60 пр.

- Борзенкова С. В. Аналітична модель зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі (НУХТ – 2017): матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (22 листопада 2017 р.) [Електронний ресурс] / Борзенкова С. В., Ладієва Л. Р. – К: НУХТ, 2017 р. – 297 с. — Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>

- Борзенкова С. В. Автоматизація процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі (АКІТ – 2017): матеріали Одинадцятої науково-практичної конференції студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (7 грудня 2017 р.) [Електронний ресурс] / Борзенкова С. В., Ладієва Л. Р. – К.: НТУУ «КПІ», 2017 р.

- Борзенкова С. В. Варіаційне дослідження математичної моделі процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі(АКІТ – 2018): матеріали П'ятої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (11 квітня 2018 р., м. Київ)/ Борзенкова С. В., Ладієва Л. Р. – К.: НТУУ «КПІ», 2018 р. – 204 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез.

- Борзенкова С. В. Моделювання динаміки процесу зневоднення та гранулювання в псевдозрідженому шарі(ISDMCI – 2018): матеріали Чотирнадцятої Міжнародної наукової конференції (21-27 травня 2018 р., м. Залізний порт)/ Борзенкова С. В., Ладієва Л. Р.

- Борзенкова С. В., Ладієва Л. Р. Спосіб автоматичного керування процесом зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. Патент України на корисну модель № u201712494.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання: « 29 » березня 2018 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Аналіз літературних і патентних джерел по дослідженню процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. Формулювання задачі автоматизації процесу. Підготовка заявки на патент на корисну модель.	30.10.17	
2.	Розробка математичної моделі процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі	20.11.17	
3.	Підготовка матеріалів з результатами досліджень до публікації статті у фахових виданнях і до публікації тез доповідей та участі у конференціях	25.12.17-22.03.18	

4.	Розробка експертної системи для діагностування аварійних ситуацій в процесі зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі	12.03.18	
5.	Розв'язання задачі прогнозування якості готового продукту з використанням методу k найближчих сусідів	25.03.18	
6.	Дослідження поведінки ТОК на наявність в ньому хаотичних коливань	05.04.18	
7.	Розробка та дослідження систем керування режимом перемішування у псевдозрідженому шарі	25.04.18	
8.	Розробка стартап-проекту «Система пошукової ідентифікації з використанням градієнтного алгоритму»	30.04.18	
9.	Обробка та узагальнення результатів дослідження процесів зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. Оформлення пояснювальної записки	03.05.18	
10.	Підготовка матеріалів з результатами досліджень процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. Підготовка презентації	10.05.18	

Студент

(підпис)_____
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)_____
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація присвячена розв'язанню задачі проектування та дослідження системи керування режимом перемішування в грануляторі псевдозрідженого шару в процесі зневоднення та гранулювання із забезпеченням у ній хаотичних коливань.

У науковій роботі досліджено гранулятор псевдозрідженого шару як ТОК, розроблено принципово нову модель процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі, експертну систему діагностування аварійних ситуацій, систему прогнозування якості готового продукту, досліджено ступінь хаотичності системи, розроблено систему керування технологічним процесом.

За результатами досліджень теми магістерської дисертації опубліковано 1 наукову статтю у іноземному фаховому виданні, тезисні доповіді на 6 конференцій, отримано патент на корисну модель.

Пояснювальна записка до магістерської дисертації має обсяг 145 сторінок та містить 31 рисунок, 26 таблиць, 27 літературних джерел.

Результати роботи можуть бути використані та впроваджені в системах керування процесом зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. Розроблена система керування може бути використана в курсі «Спеціальні розділи теорії автоматичного керування», експертна система діагностування аварійних ситуацій та система прогнозування якості готового продукту в курсах «Інтелектуальні системи управління» та «Технології штучного інтелекту».

Ключові слова: псевдозріджений шар, гранулятор, зневоднення, гранулювання, система керування, детермінований хаос, керування хаосом, апарат з псевдозрідженим шаром, об'єкт керування, математична модель.

ABSTRACTS

The master's dissertation focuses on solving the problem of designing and researching the control systems of the mixing regime in the fluidized bed granulator by the provision of chaotic oscillations.

In the treatise the fluidized bed granulator was studied as a control object. Also a fundamentally new model of the process, an expert system for diagnosing emergency situations, a system for forecasting the quality of the finished product, the degree of chaotic state of the process and systems for controlling the technological process were developed.

According to the results of the master's theses' research, the scientific article was published in a foreign professional magazine, reports at 6 scientific and practical conferences were published. Also the patent for a useful model has been obtained. The master's theses' explanatory note is 145 pages long and contains 31 figures, 26 tables, 27 literary sources.

The results of the work can be used and implemented in the control systems for the process of dewatering and granulation in a fluidized bed. The developed control system can be used in the course "Special sections of the theory of automatic control", an expert system for diagnosing emergency situations and a system for predicting the quality of the finished product – in the courses "Intelligent management systems" and "Technologies of artificial intelligence".

Keywords: fluidized bed, granulator, dewatering and granulation, control system, deterministic chaos, chaos control, fluidized bed apparatus, control object, mathematical model, perturbation channel, control channel, time characteristics.

ЗМІСТ

Вступ	12
1. Дослідження процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі.....	14
1.1. Переваги апаратів псевдозрідженого шару	14
1.2. Основні способи застосування методу киплячого шару	15
1.3. Механізми гранулоутворення.....	17
1.4. Гранулятор псевдозрідженого шару як ТОК	19
2. Створення експертної системи діагностування аварійних ситуацій з рекомендаціями по їх усуненню.....	22
2.1. Аналіз технологічних об'єктів керування гранулятора для створення експертної системи.....	22
2.2. Створення бази знань для аналізу станів процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі.....	23
2.3. Розробка експертної системи у вигляді веб-сайту	27
3. Математичне моделювання процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі	33
3.1. Статичні та динамічні характеристики гранулятора псевдозрідженого шару.....	33
3.2. Варіаційне дослідження математичної моделі процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі	43
3.3. Дослідження теорії хаосу для випадку псевдозрідження	44
4. Розробка та дослідження системи керування хаосом	53
4.1. Актуальність системи керування хаосом у грануляторі псевдозрідженого шару	53

4.2. Розробка системи керування хаосом	53
4.3. Результати роботи системи керування	58
5. Розробка оптимального керування процесом зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі.....	63
5.1. Визначення об'єкта керування	63
5.2. Вибір критерію оптимальності.....	66
5.3. Необхідні умови оптимальності.....	66
5.4. Розрахунок оптимального програмного керування	68
5.5. Розрахунок оптимального керування зі зворотнім зв'язком.....	69
5.6. Порівняння результатів отриманих для оптимального керування зі зворотнім зв'язком.....	75
6. Прогнозування якості готового продукту	77
6.1. Застосування методу k-найближчих сусідів для розв'язання задачі прогнозування якості готового продукту	77
6.2. Реалізація задачі прогнозування	78
7. Розробка стартап-проекту «Система керування перемішуванням у псевдозрідженому шарі»	83
7.1. Початок розробки, ідея, властивості, переваги.....	83
7.2. Аналіз зовнішнього маркетингового середовища.....	88
7.2.1. Аналіз факторів макромаркетингового середовища	88
7.2.2. Аналіз факторів мікромаркетингового середовища.....	92
7.3. Формулювання управлінської проблеми.....	95
7.4. Конкурентний аналіз	96
7.5. Ринкові стратегії стартап-проекту	101
7.6. Продуктові (маркетингові) стратегії стартап-проекту.....	105

Висновки.....	110
Перелік використаної літератури	111
Додаток 1. База знань про об'єкти керування установки зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі	
Додаток 2. Дерево аварійних ситуацій з рекомендаціями по їх усуненню	
Додаток 3. Лістинги програмного коду веб-сайту експертної системи діагностування аварійних ситуацій з рекомендацією по їх усуненню	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ТОК – технологічний об’єкт керування.

ПШ – псевдозріджений шар.

ОК – об’єкт керування.

HTML – HyperText Markup Language – мова гіпертекстової розмітки.

SASS – Syntactically Awesome Stylesheets – синтаксично дивовижні таблиці стилів.

CSS – Cascading Style Sheets – каскадні таблиці стилів.

JS – JavaScript – мультипарадигменна мова програмування.

ГЦ – граничний цикл.

БЗ – база знань.

КШ – киплячий шар.

ВСТУП

Зростання і розвиток аграрної галузі України, збільшення різноманіття рослин та культур, що вирощуються, потребує підтримки у вигляді збагачення землі та рослин низкою різних поживних елементів у засвоюваній формі. Тобто, оскільки із врожаєм видаляються поглинуті рослинами з ґрунту поживні елементи, то місткість деяких з них може виявитися недостатньою для отримання високих врожаїв. Тоді постає необхідність поповнення врожайності за рахунок збільшення у ґрунті необхідних речовин у вигляді добрив.

Гранулювання є однією з найпоширеніших операцій в технології виготовлення мінеральних добрив. Доведено, що гранульований продукт має низку переваг перед порошкоподібним. А саме, краще засвоюється, не вивітрюється та є зручнішим у застосуванні. Тому, починаючи з середини 80-х років, практично всі тверді добрива на ринку випускають в гранульованому вигляді.

Промислове застосування методу псевдозрідження викликано суттєвим переліком його переваг. У псевдозрідженому шарі відбувається активне перемішування твердої фази, якість обробки якої безпосередньо впливає на якість готового продукту. Також гранулятори псевдозрідженого шару мають відносно просту конструкцію, непогано піддаються механізації та автоматизації.

При сучасних світових тенденціях до зростання споживання продукції різних галузей промисловості та екологічній ситуації гостро постає проблема раціонального використання в промисловому виробництві енергетичних та сировинних ресурсів з метою одержання максимальної кількості готового продукту заданої якості. Важливим етапом вирішення цієї задачі є створення адекватної математичної моделі процесу.

Математична модель має правильно відображати технологічний процес, його характерні риси, але також не має бути переускладнена деталями, що несуттєво впливають на вирішення поставленої задачі.

Отримання адекватної моделі апарату дозволяє коректно розв'язати задачі, поставлені у магістерській дисертації, а саме:

- вибрати стратегію пошуку оптимального рішення, вирішити задачу динамічної оптимізації для даного технологічного процесу і, як результат сформувати навички використання методів оптимізації при проектуванні систем, плануванні і аналізі їх функціонування, керуванні динамічними системами;
- розробити реальну для втілення стратегію керування технологічним процесом;
- порівняти результати роботи різних систем керування для вибору найкращої.

1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ТА ГРАНУЛЮВАННЯ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

1.1. Переваги апаратів псевдозрідженого шару

В апаратах псевдозрідженого шару здійснюється контакт між розвиненою поверхнею дисперсної твердої фази, власне тої, що складає шар, і вертикальним потоком зважуючого потоку газу (рідше крапельної рідини). Розвинена поверхня контакту твердої та газової фаз необхідна для проведення процесів теплообміну, випалювання, горіння, сушки, каталітичних процесів за участю дисперсних каталізаторів, адсорбції та ін.

У порівнянні з іншими апаратами, в яких також відбувається контакт дисперсної твердої і газової (рідкої) фаз (частіше це апарати з нерухомим шаром, що фільтрується) апарати з псевдозрідженим шаром володіють наступними перевагами:

- відносна простота конструкції – найчастіше це вертикальний апарат з прямокутним або круглим перетином, зазвичай не має рухомих частин;
- практична ізотермічність всього обсягу, забезпечується інтенсивним перемішуванням дисперсної фази, має велике значення для більшості процесів з виділенням або поглинанням теплоти;
- можливість підвищення витрат зважувального газу без збільшення перепаду тиску на шарі матеріалу, що є суттєвим зважаючи на обмеженість напорів, що розвиваються вентиляторами великої продуктивності;
- текучість шару, яка дозволяє безперервно вивантажувати дисперсний матеріал через простий патрубок.

Недоліки апаратів з псевдозрідженим шаром дисперсного матеріалу пов'язані з інтенсивним перемішуванням в обсязі шару, наприклад:

- знос конструкційних матеріалів, а також ерозія внутрішніх поверхонь апарату гранулювання;
- виникнення електростатичного заряду на поверхні псевдозріджуваних діелектричних матеріалів;
- різні часи перебування окремих порцій дисперсного матеріалу (його окремих частинок) в обсязі шару, що призводить до різного ступеня обробки (нагрівання, випалювання, вигорання, висушування, адсорбції, розмірів гранул або кристалів і ін.) різних частин загального потоку, що вивантажується з апарату дисперсного матеріалу.

Процес псевдозрідження забезпечує рівномірну структуру псевдозрідженого шару тільки при використанні в якості псевдозріджуючого агента крапельних рідин. При псевдозрідженні відносно легкими і малов'язкими газами в шарі утворюються газові бульбашки, всередині яких контакт дисперсного матеріалу з суцільним середовищем практично відсутній, що особливо суттєво, наприклад, для каталітичних процесів. При псевдозрідженні дуже дрібних частинок (менше 1 мм в діаметрі) майже неможливо запобігти утворенню каналів, що в більшому ступені погіршує якість міжфазного контакту в шарі. Кращими для забезпечення рівномірності псевдозрідження є монодисперні, округлі частинки з мінімальною поверхневою адгезією (хорошою сипучістю).

На внутрішню структуру псевдозрідженого шару в значній мірі впливає пристрій (конструкція) газорозподільної решітки в нижній частині апарату, через яку в шар подається псевдозріджуючий агент.

1.2. Основні способи застосування методу киплячого шару

Використання методу киплячого шару (КШ) з метою зневоднення суспензій, розчинів та деяких кристалогідратів має такі переваги:

- заміна багатостадійного процесу одностадійним;
- можливість отримання гранульованого матеріалу;
- зменшення витрат палива та більш глибоке використання температурного потенціалу;
- багатократне зменшення матеріалоемності;
- зниження вартості обладнання;
- зменшення виробничих площ;
- можливість повної автоматизації технологічного процесу.

Класична схема зневоднення складається з наступних стадій:

- випарювання в одно- або багатокорпусних випарних апаратах, а також апаратах зануреного згоряння;
- згущення кристалічної пульпи;
- фільтрації або центрифугування;
- сушки осаду.

Якщо продукт необхідно одержати у гранульованому вигляді додатково використовується той або інший технічний спосіб грануляції з відповідним апаратурним обладнанням.

Застосування КШ дозволяє здійснити практично всі зазначені вище стадії в одному апараті, який разом з системою насосів, вентиляторів, ежекційних установок, запірною та регулюючою арматурою утворює технологічну лінію [21].

Найбільший ефект для великотоннажних виробництв досягається заміною стандартних сушарок (у першу чергу барабанних) на апарати КШ. Ефективність визначається скороченням витрат палива, багатократним зменшенням металоємності та вартості апаратів.

Зменшення витрат палива зумовлено значним скороченням теплових втрат і глибшим використанням температурного потенціалу теплоносія. Теплові втрати від стінок апаратів КШ обмежуються самою

зоною КШ, висота якого звичайно становить 1,0–1,5 м, а температура – 120–150 °С. Завдяки теплоізоляції втрати становлять 3–5 %.

Враховуючи, що середні витрати палива в апаратах КШ на 35–45 % нижча, ніж у барабанних сушарках, перехід на технологію КШ в умовах середньо- та великотоннажного (106–107 т/рік) виробництв забезпечить суттєве покращення загального балансу витрат палива.

Максимальні одиничні продуктивності установок КШ в 1,2–1,5 рази перевищують відповідний показник для барабанних сушарок. При зневодненні розчинів кількість випареної в установках КШ води сягає 14–15 т/год.

Поряд із зменшенням витрат палива, використання апаратів КШ забезпечує багатократне зменшення металоємності. Також маса металевих деталей апарата КШ приблизно вдесятеро менша за масу металевих деталей барабанної сушарки.

1.3. Механізми гранулоутворення

Процес зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі з використанням розпилення розчинів відбувається наступним чином.

Розчин, що містить тверду речовину та розпилюється у псевдозрідженому шарі, частково осідає на частинках шару. Певна його кількість закріплюється на поверхні існуючих частинок і утворює нові центри грануляції. Поверхнєве збільшення гранул стає більш імовірним при збільшенні сил зчеплення крапель з частинками. Адгезійні властивості крапель залежать від шорсткості поверхні гранул, характеристик розчину, найважливішою з яких є пропорційне відношення у краплі рідини та твердої речовини. Воно залежить від ступеня вологості, температури а також хімічного складу розчину. При зменшенні вологості розчину сили адгезії пропорційно зменшуються, що спричиняє зростання кількості утворених з розчину частинок.

У псевдозрідженому шарі, окрім формування нових центрів грануляції, відбувається також нарощення існуючих гранул. Судячи з вищенаведеного, це стає можливим при кристалізації розчину на поверхні частинок – центрів грануляції. Альтернативний шлях збільшення гранул – це їх злипання між собою. Агломерація має місце в момент зштовхування частинок при суттєво великих силах зчеплення між ними. Вони можуть бути присутні в рідкій фазі. Спричинений великою локальною вологістю, або високою температурою, надлишок розчину на частинках призводить до того, що сили поверхневого натягу стають більшими за сили, що обумовлюють перемішування частинок. Тоді відбувається зрощення гранул. При поступовому сушінні рідини формуються кристалічні містки, які з'єднують частинки агломерату між собою. Якщо зв'язки між шматочками агломерату неміцні або утворюється недостатня кількість кристалів агломерати руйнуються до вихідних частинок.

Підсумовуючи вищенаведене можна зробити висновок, що гранулювання в псевдозрідженому шарі - це багатостадійний процес зростання існуючих гранул і формування нових.

Характер гранулоутворення, як і гранулометричний склад готового продукту залежить від властивостей речовин, що приймають участь у гранулюванні, режимних параметрів і конструктивних характеристик апарату гранулювання. У випадку поверхневого зростання гранул, їх діаметр пропорційний продуктивності, діаметру частинок рециклу і оберненопропорційний до витрат. Щоправда цей режим існує лише в суворих умовах, в яких в шарі не утворюються нові центри грануляції, а також не відбувається агломерація.

Проаналізувавши результати різних досліджень, можна зробити висновок, що на гранулометричний склад продукту вагомо впливає температура псевдозрідженого шару. При гранулюванні в шарі з температурою до 100 °C діаметр гранул зменшується зі зниженням

температури шару, через зменшення кількості рідини в розчині, що підвищує ймовірність утворення нових часток.

Чим менше рідини в розчині, тим менше його адгезійна здатність і тим більше вірогідність утворення нових центрів грануляції. Підтримання постійної концентрації розчину призводить до укрупнення гранул.

Загальний вигляд азотно-гумінових добрив та зріз гранули наведено на рисунку 1.1.

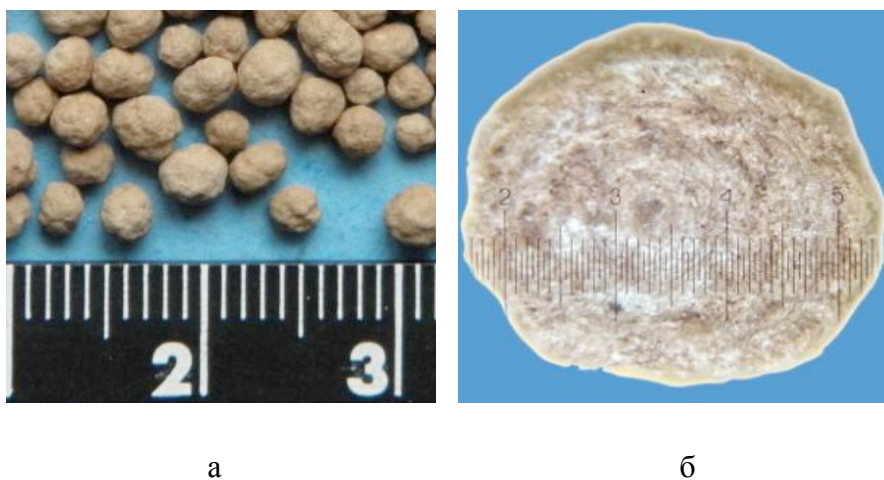


Рис. 1.1. Загальний вигляд отриманих азотно-гумінових добрив: а – товарна фракція гранул б – зріз гранул (збільшення в 20 разів)

1.4. Гранулятор псевдозрідженого шару як ТОК

Об'єктом дослідження у магістерській дисертації було обрано апарат для зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Псевдозріджений шар – це стан дисперсної системи, при якому тверді частинки у межах шару стають «завислими» (як рідкі частинки у загальній масі рідини), а шар в цілому має основні властивості рідини: спроможний текти, переливатися, в ньому майже відсутнє внутрішнє тертя.

Промислове застосування методу псевдозрідження обумовлене його численними перевагами, а апарати із псевдозрідженим шаром мають відносно просту будову, непогано піддаються механізації та автоматизації.

Утворення гранул у псевдозрідженому шарі для всіх випадків використання вихідних речовин можна представити у наступному вигляді. На псевдозріджений шар, що складається з твердих часток, напилюється через форсунки диспергована рідка фаза. Тверда фаза, що міститься у краплях, відкладається (кристалізується) на частках, а рідина випаровується за рахунок фізичного тепла зріджувального газу. Об'єм шару підтримується постійним за рахунок безперервного вивантаження готових гранул.

При гранулюванні розчинів зневодненням на перший план висувається вимога отримання продукту, що має певний гранулометричний склад. В загальному випадку механізм росту гранул залежить від властивостей використаних речовин, режиму процесу та інших факторів, що визначають характер взаємодії диспергованих рідкої та твердої фаз.

В нашому випадку численні дослідження підтвердили, що найбільше на стан готового продукту, основним показником якості якого є еквівалентний діаметр часток, впливає температура псевдозрідженого шару, в якому вони формуються. Саме тому її обрано головною керованою величиною в апараті, що розглядається. Розглянемо побудову апарату для гранулювання речовин у псевдозрідженому шарі. У гранулятор 1 із псевдозрідженим шаром за допомогою виконавчого пристрою 2 подають розчин, а виконавчим пристроєм 3 подають центри грануляції. Знизу до верху подається нагрітий теплоносіє - повітря. Готовий продукт – гранули вивантажують за допомогою виконавчого пристрою 4.

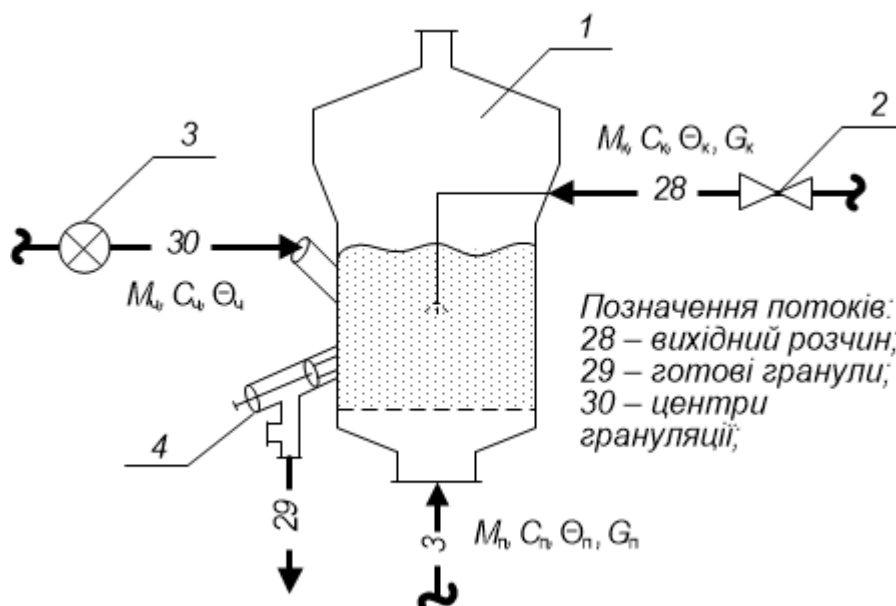


Рис. 1.2. Апарат для гранулювання термолабільних речовин у псевдозрідженому шарі:
 1 – гранулятор, 2 – пристрій для введення вихідного розчину, 3 – пристрій для введення частинок; 4 – пристрій для вивантаження готового продукту

Спираючись на попередні експериментальні та теоретичні дослідження, що містяться у вивченій літературі, найбільший вплив на температуру псевдозрідженого шару як керовану величину і на якість перебігу процесу в цілому мають витрати початкового розчину – сульфату амонію а також теплоносія – повітря. Тому кожна з них може бути обрана у якості керувального впливу, залежно від постановки задачі.

2. СТВОРЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ З РЕКОМЕНДАЦІЯМИ ПО ЇХ УСУНЕННЮ

2.1. Аналіз технологічних об'єктів керування гранулятора для створення експертної системи

Основними факторами, що впливають на процес грануляції, є:

- початкові властивості розчину сульфату амонію, центрів гранулювання;
- температура гріючої пари, що подається в гранулятор;
- тривалість процесу в грануляторі;
- якість сировини (гранулометричний склад), вологість.

Для забезпечення максимального виходу цільових продуктів і мінімальної кількості побічних, а також досягнення високих техніко-економічних показників процесу, потрібно дотримуватись наступних технологічних параметрів:

- концентрація розчину сульфату амонію на вході повинна бути в межах 60-80%, що визначає якість гранульованого продукту на виході;
- гранулометричний склад часток-центрів гранулювання має відповідати нормам, щоб забезпечити адекватне протікання процесу;
- витрати гріючої пари мають бути в межах $15-25 \cdot 10^{-3}$ кг/с, а температура - $110-160^{\circ}\text{C}$, що забезпечить необхідний гранулометричний склад готового продукту.

Тому, для швидкого пошуку та діагностування технологічного параметру, вихід якого за допустимі межі став причиною аварійної ситуації, а також прийняття рішення по оперативному усуненню проблеми, було прийняте рішення про створення експертної системи.

2.2. Створення бази знань для аналізу станів процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі

Експертна система – це комп’ютерна система, що здатна частково замінити спеціаліста-експерта в розв’язанні проблемної (аварійної) ситуації. Її ключовими компонентами є механізм виведення та база знань.

База знань (БЗ) в ЕС – це особливого роду база даних, що призначена для зберігання довгострокових даних, що описують розглянуту область знань, і правил, що описують доцільні перетворення даних цієї області [17]. Тобто, вона містить перелік ситуацій, характерних для обраної предметної області, також правила поведінки чи висновки, що звичайно властиві для кожної ситуації.

Механізм виведення в свою чергу складається з диспетчера, який встановлює послідовність застосування правил та висновків та інтерпретатора, який визначає яким саме чином треба застосувати правило.

Основною задачею створення бази знань є врахування усіх можливих факторів впливу на процес для подальшого їх аналізу і вибору найбільш суттєвих, а також для можливості створення експертної системи та системи нечіткого керування. З метою формалізації процесу отримання знань у роботі було використано спеціальний алгоритм аналізу технологічних змінних і можливих аварійних ситуацій (рис. 2.1.)

Наведемо опис цього алгоритму [20].

Блок 1. Вказується назва технологічної змінної u_j та її шифр.

Блок 2. Проводиться ідентифікація типу u_j (вхідна, вихідна або регламентна).

Блок 3. Вказується назва та шифр матеріального потоку, характеристикою якого виступає u_j .

Блок 4. Вказується шифр (адреса) технологічного пристрою, для якого u_j — вихідна змінна.

Блок 5. Вказується шифр (адреса) технологічного пристрою, для якого y_j — вхідна змінна.

Блок 6. Вказується місце де вимірюється y_j (трубопровід, зона печі, тощо).

Блок 7. Вказується одиниця вимірювання y_j .

Блок 8. Вказується спосіб вимірювання (автоматичний чи лабораторний).

Блок 9. Задається періодичність вимірювання, тобто Δt , через який виконується опитування вимірювального пристрою, а також Δt_1 , через який проводиться відбір проб для лабораторного аналізу, та Δt_2 , — час, що витрачається на проведення аналізу.

Блок 10. Визначається спосіб зміни технологічної змінної y_j (ніякого, ручне, автоматичне, керувальний вплив у САР цієї чи іншої змінної).

Блок 11. Визначаються допустимі границі $y_{j \min}$, $y_{j \max}$.

Блок 12. Виявляється приналежність y_j до показників якості продукції. Якщо y_j — не є показником якості, то здійснюється перехід до блоку 13, якщо так — перехід до блоку 14.

Блок 13. Складається перелік показників якості продукту, що пов'язані з y_j .

Блок 14. Уточнюється, чи є y_j причиною порушення (аварії). В разі позитивної відповіді відбувається перехід до блоку 15, негативної — до блоку 24.

Блок 15. Початок циклічних дій: операції здійснюються для кожного N -о порушення (аварії).

Блок 16. Формулюються ознаки порушення (аварії).

Блок 17. Визначається інтервал значень для y_j , в якому проявляються ознаки порушення (аварії), описані в блоці 16.

Блок 18. Складається перелік техніко-економічних наслідків N -о порушення (аварії).

Блок 19. Оцінюється імовірність порушення (аварії) у N -у аварійному інтервалі. Імовірність оцінюється у % або частках одиниці.

Блок 20. Перевірка умови складання повного переліку порушень (аварій) для u_j . Якщо повний перелік складений, то перехід до блоку 21, якщо ні — до блоку 22.

Блок 21. Надання коду значення «ТАК».

Блок 22. Надання коду значення «НІ».

Блок 23. Умова закінчення циклічних дій.

Блок 24. Вказується шифр контуру контролю чи керування змінної u_j .

Блок 25. Приймається рішення щодо використання змінної u_j для оцінювання та прогнозування ситуації у поточному апараті.

Базу даних для аналізу станів технологічного процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі побудовану за вищенаведеним алгоритмом наведено у додатку 1.

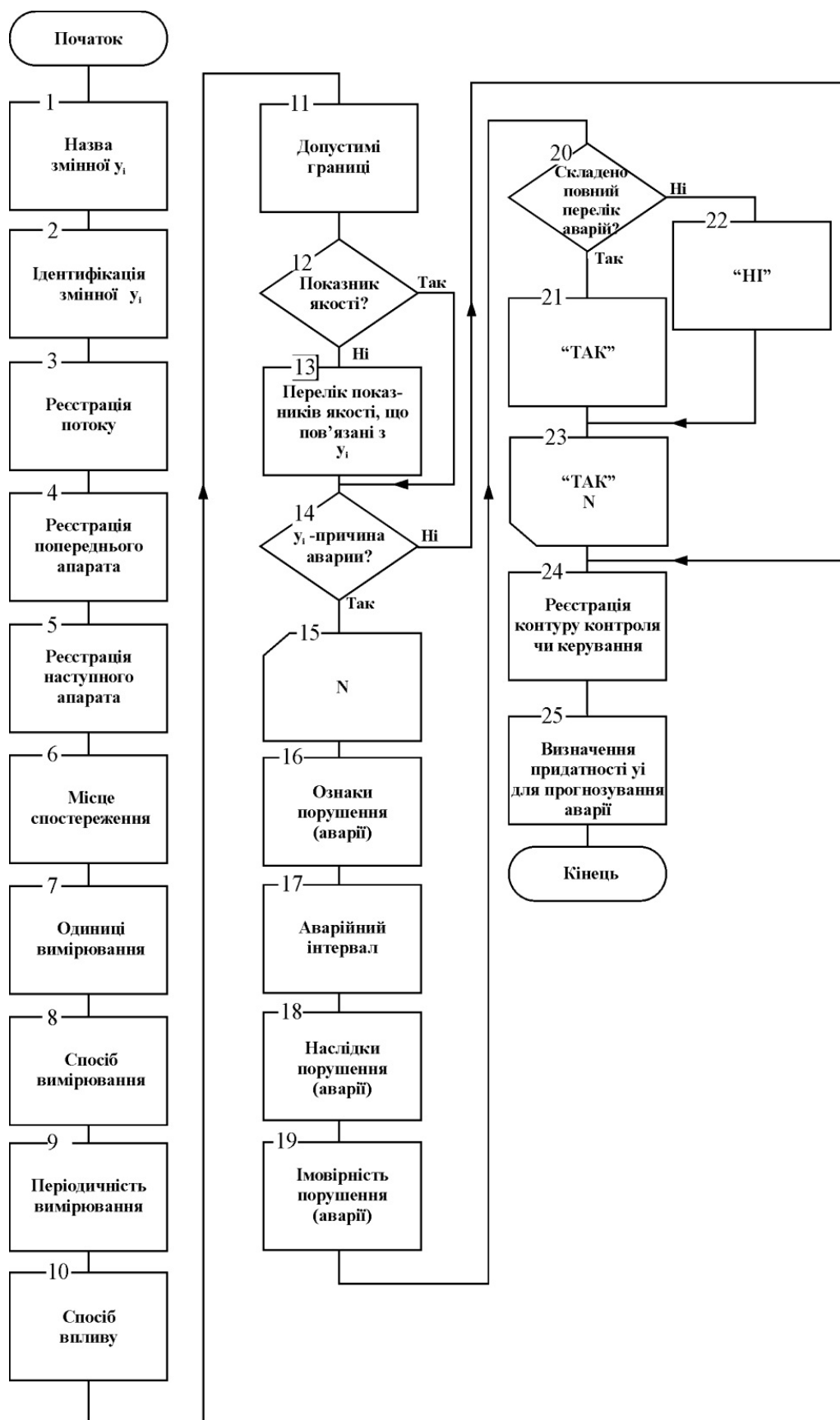


Рис. 2.1. Схема алгоритму фіксації характеристик технологічних змінних

2.3. Розробка експертної системи у вигляді веб-сайту

До аварійних ситуацій в процесі гранулювання у псевдозрідженому шарі слід віднести брак продукції, тобто вихід вологості готового продукту за максимально допустиме значення; недостатню продуктивність процесу, тобто зниження відсотку готової продукції нормального розміру, а також вибух у калорифері, який підігріває теплоносії.

Використовуючи перелік аварійних ситуацій, їхні причини і наслідки, було побудовано дерево аварійних ситуацій, можливих у досліджуваному процесі.

Дерево аварійних ситуацій з рекомендаціями по їх усуненню наведено у додатку 2. Отримане дерево можна використовувати для розв'язання задач як прогнозування, так і діагностування.

На основі отриманого дерева аварійних ситуацій було спроектовано експертну систему діагностування причин можливих несправностей у вигляді веб-сайту. Для цього було використано наступні технології:

- мову структурування та представлення інформації (мову гіпертекстової розмітки) HTML5;
- формальну мову описання зовнішнього вигляду веб-сторінок, що написані за допомогою розмітки HTML, каскадні таблиці стилів третього покоління CSS3. Головною їх відмінністю від попередніх є підтримка лінійних та радіальних градієнтів, тіней, згладжування. Також, специфікація розбита на модулі, що дозволяє розробляти їх незалежно один від одного;
- модуль Sass – метамова на основі CSS, що призначена для підвищення рівня абстракції коду CSS та спрощення каскадних таблиць стилів. В нашому проекті її використано з метою визначення кольорової гами всіх елементів сайту, а в подальшому, код на Sass було перетворено в

більш розширений код на CSS за допомогою інструменту зборки та автоматизації проектування веб-сайту Gulp;

- jQuery – бібліотека JavaScript, призначена для спрощення коду в JavaScript та забезпечення взаємодії JavaScript та HTML. З його допомогою стало можливим створити логіку сайту: переходів між рівнями дерева та взаємодії з користувачем, використавши спрощений синтаксис;

- фреймворк Bootstrap, що включає в себе HTML- та CSS-шаблони оформлення типографіки, веб-форм, кнопок, міток, блоків навігації та інших компонентів веб-інтерфейсу, зокрема JavaScript-розширення [17]. Його основне призначення – спрощення роботи з вищепереліченими технологіями за рахунок використання раніше опрацьованих та створених шаблонів. За допомогою Bootstrap було створено структуру та верхнє меню (шапку сайту), а також адаптовано їх під різні розширення екранів.

Сайт доступний для перегляду як на комп'ютері так і на екранах планшетів та смартфонів. Ознайомитися з ним можна за посиланням: <https://borzenkovas.github.io/diagnosing-system/>. Він розміщений на хостингу GitHub - найбільшому веб-сервісу для хостингу ІТ-проектів і їх спільної розробки. Він заснований на системі контролю версій Git і розроблений на Ruby on Rails і Erlang компанією GitHub, Inc [17].

На головній сторінці сайту можна побачити перелік основних аварійних ситуацій, при натисканні на кожен з яких можна поступово відслідкувати причину аварії, а також переглянути рекомендації по її усуненню. Під аварійними ситуаціями в нашому дослідженні мається на увазі зокрема вихід параметрів готового продукту за допустимі межі.

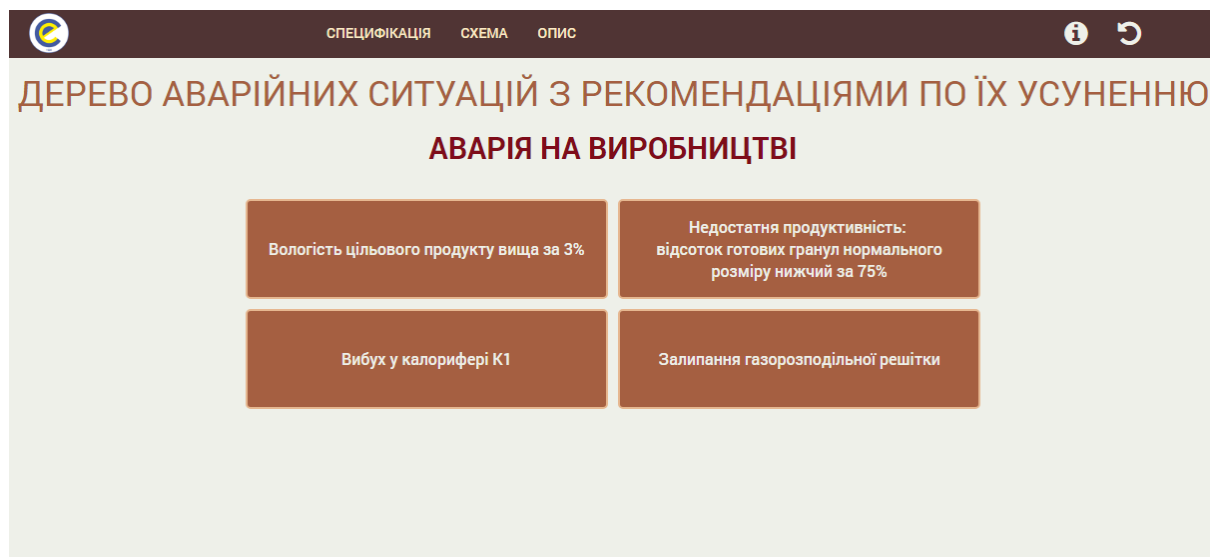


Рис. 2.2. Головна сторінка сайту

Також, на головній сторінці сайту є кнопки Специфікація, Схема та Опис, при натисканні на які можна переглянути відповідну документацію по процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. Також є кнопка Інформація, при натисканні на яку можна переглянути інформацію про проект та його розробника.



Рис. 2.3. Інформація про призначення сайту та його розробника

Для діагностування причин аварійної ситуації обираємо аварію, що нас цікавить.

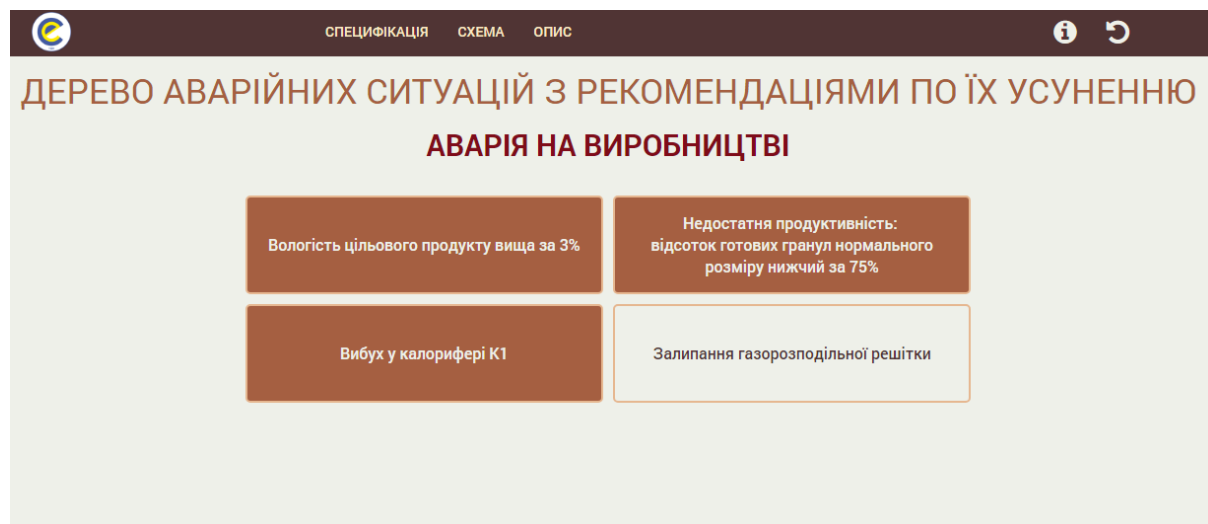


Рис. 2.4. Верхній рівень аварійних ситуацій у процесі зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі

Після вибору аварії перед користувачем відкривається перший (верхній) рівень причин аварії. Обираємо певну причину аварії і переходимо на сторінку з рівнем нижче – відхиленнями параметрів, що вплинули на цю причину.

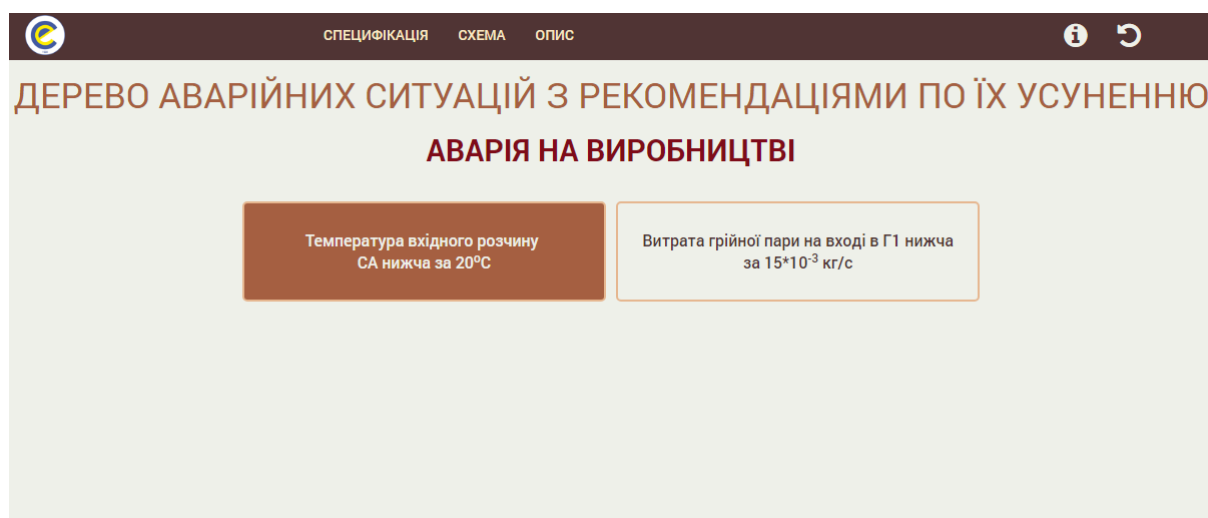


Рис. 2.5. Другий рівень для аварійної ситуації «Залипання газорозподільної решітки»

Таким чином ми пересуваємося до найнижчого рівня, на якому користувач-оператор отримує рекомендацію для уникнення або усунення аварії.

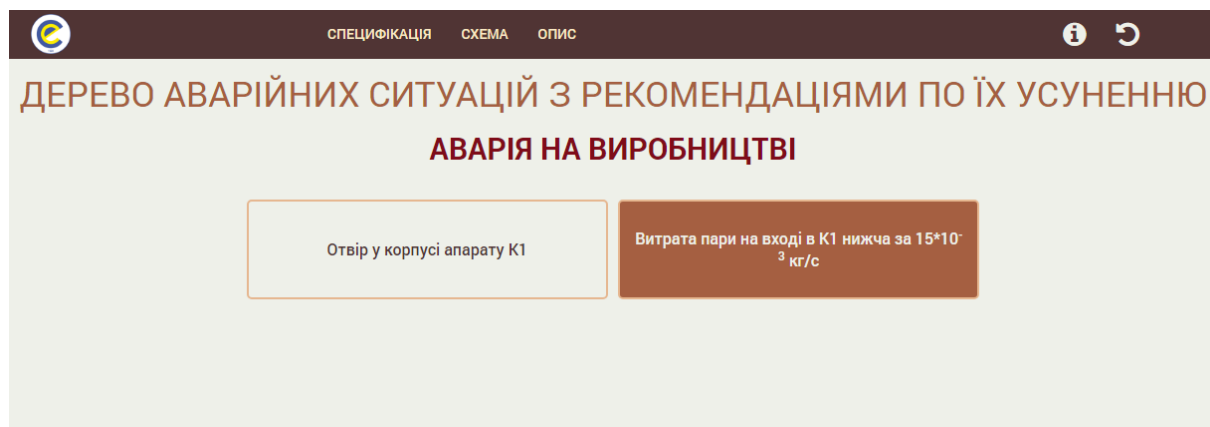


Рис. 2.6. Третій рівень для аварійної ситуації «Залипання газорозподільної решітки»

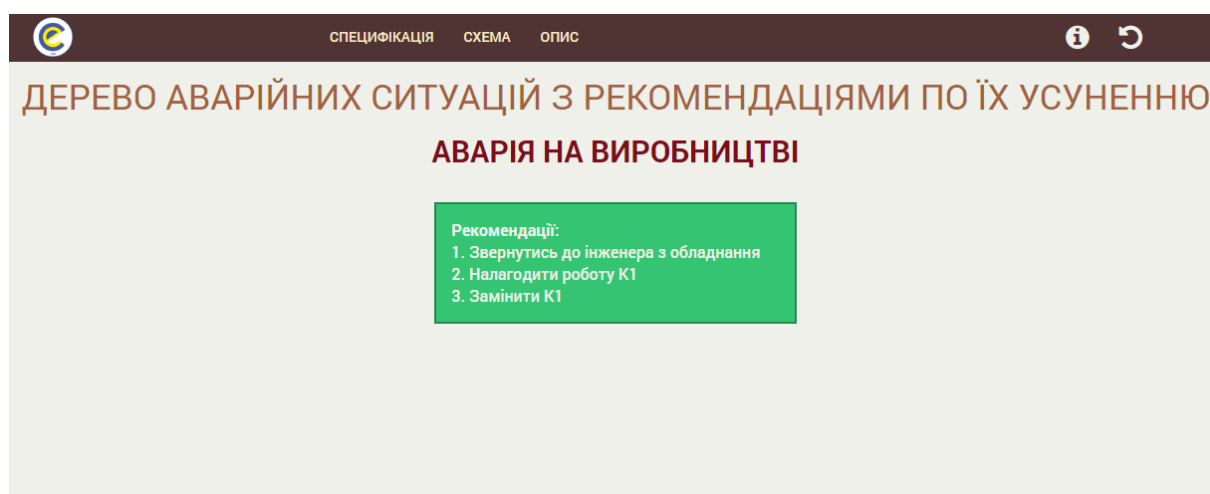


Рис. 2.7. Рекомендації по усуненню причини аварійної ситуації «Залипання газорозподільної решітки»

Розроблена експертна система має зручний для користування інтерфейс, а також володіє усіма іншими перевагами експертних систем над людиною-експертом, а саме:

- легкістю передачі інформації та доступу до неї;
- зручністю розширення бази знань;
- економічною доступністю;
- швидкістю та об'єктивністю прийняття рішень незалежно від емоційних факторів;
- можливістю отримання знань з різних джерел;

- захистом та сталістю збереження інформації;
- можливістю використання системи в якості навчальної програми.

3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ТА ГРАНУЛЮВАННЯ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

3.1. Статичні та динамічні характеристики гранулятора псевдозрідженого шару

При створенні моделі процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі розглянуто як гетерогенний трифазний процес під час якого між собою взаємодіють три окремі фази: частинки – центри гранулювання, вихідна речовина – сульфат амонію у вигляді крапель та теплоносій – повітря.

Табл. 3.1 – Значення статичного режиму у процесі зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі

№	Позначення	Значення	Назва параметру	Розмірність
1	$M_{\text{ч}}$	1,5	Маса частинок	кг
2	$M_{\text{к}}$	2	Маса крапель	кг
3	$M_{\text{п}}$	3,5	Маса повітря	кг
4	$M_{\text{ч}}^0$	1,53	Маса завантажуваних частинок	кг
5	$M_{\text{р}}$	0,132	Молекулярна розчину	кг/моль
6	$C_{\text{ч}}$	1420	Питома теплоємність часток	Дж/(кг·К)
7	$C_{\text{к}}$	1590	Питома теплоємність крапель	Дж/(кг·К)
8	$C_{\text{п}}$	1009	Питома теплоємність повітря	Дж/(кг·К)
9	$C_{\text{п}}^0$	1015	Початкова теплоємність повітря	Дж/(кг·К)
10	$\Theta_{\text{ч}}$	373	Температура часток	К
11	$\Theta_{\text{к}}$	370	Температура крапель	К
12	$\Theta_{\text{п}}$	393	Температура повітря	К
13	$\Theta_{\text{ч}}^0$	335	Початкова температура часток	К

14	Θ_k^0	295	Початкова температура крапель	К
15	$\Theta_k^{н.у}$	297	Температура крапель при нормальних умовах	К
16	$\Theta_{п}^0$	408	Початкова температура повітря	К
17	$r_{\text{ч}}$	$1 \cdot 10^{-3}$	Коефіцієнт аксіальної дисперсії часток	с^{-1}
18	$\nu_{\text{суш}}$	0,47	Питома швидкість сушіння вологи на частинках чи в краплях	$\text{кг}_{\text{випар. вологи}} / (\text{кг} \cdot \text{с})$
19	$\nu_{\text{п}}$	4,398	Швидкість руху повітря	м/с
20	$Q_{\text{крист}}$	83000	Питома теплота сушіння крапель	Дж/кг
21	$\alpha_{\text{ч}}$	5,57	Коефіцієнт теплопередачі часток	$\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$
22	$\alpha_{\text{к}}$	5,535	Коефіцієнт теплопередачі крапель	$\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$
23	$S_{\text{ч}}$	$7,07 \cdot 10^{-7}$	Площа поверхні часток	м^2
24	$S_{\text{к}}$	$6,07 \cdot 10^{-6}$	Площа теплопередачі крапель	м^2
25	$G_{\text{к}}$	0,5	Масові витрати крапель	кг/с
26	$G_{\text{п}}$	0,3	Масові витрати повітря	кг/с
27	$\rho_{\text{к}}^{н.у}$	1766	Густина крапель при нормальних умовах	$\text{кг} / \text{м}^3$
28	$P_{\text{к}}$	133322	Поточний тиск крапель	Па
29	$P_{\text{к}}^{н.у}$	1999,84	Тиск крапель при нормальних умовах	Па
30	$\mu_{\text{п}}$	$2,3 \cdot 10^6$	Динамічна в'язкість повітря	Па·с
31	$d_{\text{ч}}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	Діаметр частки	М
32	$d_{\text{к}}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	Діаметр краплі	М
33	R	8,314	Універсальна газова стала	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} / (\text{с}^2 \cdot \text{К}^1 \cdot \text{моль}^1)$
34	ΔP	2100	Різниця парціальних тисків	
35	B	0,05420	Коефіцієнт масовіддачі	м/с

36	$Q_{\text{крисст}}$	83000	Питома теплота кристалізації крапель	Дж/кг
37	I		Прихована теплота пароутворення	Дж/кг
38	x_k		Концентрація крапель розчину	б/р

При розробці моделі були зроблені наступні припущення:

- Зміна параметрів псевдозрідженого шару відбувається в часі, без урахування радіальної складової та зміни по висоті.
- Теплообмін між повітрям, частинками та краплями є конвективним.
- Частинки монодисперсні, непористі, агломерація відсутня. Інтенсивність перемішування частинок між шарами описується коефіцієнтом осьової дисперсії r , який залежить від швидкості руху газової фази, а також властивостей частинок.
- Краплі, одержувані за допомогою пневматичної форсунки, мають вузький розподіл за розміром, що дозволяє розглядати їх як монодисперсну фазу. Між краплями відсутні зіткнення і злипання, немає налипання на стінках апарату. Краплі рухаються крізь псевдозріджений шар співспрямовані з потоком повітря.

Процес теплообміну в грануляторі описує наступна система рівнянь.

Рівняння, що описує зміну температури частинок у шарі:

$$M_{\text{ч}} C_{\text{ч}} \frac{d\Theta_{\text{ч}}}{dt} = M_{\text{ч}} C_{\text{ч}} r_{\text{ч}} \Theta_{\text{ч}}^0 + R^{\text{адг}} M_{\text{ч}} C_{\text{к}} (\Theta_{\text{к}} - \Theta_{\text{ч}}) + G_{\text{к}} x_{\text{к}} Q_{\text{крисст}} - \\ - M_{\text{п}} v_{\text{суш}} Q_{\text{вип}} + \alpha_{\text{ч}} S_{\text{ч}} (\Theta_{\text{п}} - \Theta_{\text{ч}}), \quad (3.1)$$

де C – питома теплоємність, Дж/кг·К; G – масові витрати, кг/с; Θ – температура, К, а індекси ч, к, п позначають, що параметр відноситься до частинок, крапель або повітря відповідно; $\Theta_{\text{ч}}^0$ – початкова температура

частинок, К; $r_{\text{ч}}$ – коефіцієнт аксіальної дисперсії частинок, с^{-1} ; $v_{\text{суш}}$ – питома швидкість сушіння вологи в краплях, $\text{кг}_{\text{випар. вологи}}/(\text{кг} \cdot \text{с})$; $x_{\text{к}}$ – концентрація крапель розчину; $Q_{\text{вип}}$ – питома теплота випаровування вологи, Дж/кг ; $Q_{\text{крист}}$ – питома теплота кристалізації крапель, Дж/кг ; $\alpha_{\text{ч}}$ – коефіцієнт теплопередачі частинок, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $S_{\text{ч}}$ – площа поверхні частинок, м^2 ; $R^{\text{адг}} = \frac{G_{\text{к}}}{M_{\text{ч}}^0} \cdot \chi_{\text{к}} = \frac{G_{\text{к}}}{M_{\text{ч}}^0} \cdot \left(\frac{St_{\text{к}}}{St_{\text{к}} + 0.35} \right)^2$ – питома швидкість стикання крапель з частинками (адгезії), $\text{кг}_{\text{к}}/(\text{кг}_{\text{ч}} \cdot \text{с})$,

де $M_{\text{ч}}^0$ – маса завантажуваних частинок, кг ; $\chi_{\text{к}}$ – ефективність стикання крапель з частинками;

$$St_{\text{к}} = \frac{\rho_{\text{к}} v_{\text{н}} d_{\text{к}}^2}{\mu_{\text{н}} d_{\text{ч}}} - \text{число Стокса для крапель.}$$

Рівняння, що описує зміну температури крапель у шарі:

$$M_{\text{к}} C_{\text{к}} \frac{d\Theta_{\text{к}}}{dt} = G_{\text{к}} C_{\text{к}} \Theta_{\text{к}}^0 - R^{\text{адг}} M_{\text{ч}} C_{\text{к}} (\Theta_{\text{к}} - \Theta_{\text{ч}}) + M_{\text{п}} v_{\text{суш}} Q_{\text{вип}} + \alpha_{\text{к}} S_{\text{к}} (\Theta_{\text{п}} - \Theta_{\text{к}}), \quad (3.2)$$

де $\Theta_{\text{к}}^0$ – початкова температура крапель, К; коефіцієнт теплопередачі крапель, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $S_{\text{к}}$ – площа теплопередачі крапель, м^2 .

Ріст гранул тим імовірніший, чим більші сили адгезії крапель рідини з твердими частинками та її швидкості. Адгезійні властивості краплі, в свою чергу, залежать від жорсткості поверхні гранул і властивостей розпилюваної речовини.

Рівняння, що описує зміну температури гріючого повітря:

$$M_{\text{п}} C_{\text{п}} \frac{d\Theta_{\text{п}}}{dt} = G_{\text{п}} (C_{\text{п}}^0 \Theta_{\text{п}}^0 - C_{\text{п}} \Theta_{\text{п}}) - \alpha_{\text{ч}} S_{\text{ч}} (\Theta_{\text{п}} - \Theta_{\text{ч}}) - \alpha_{\text{к}} S_{\text{к}} (\Theta_{\text{п}} - \Theta_{\text{к}}) \quad (3.3)$$

де $C_{\text{п}}^0$ – початкова теплоємність повітря, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\Theta_{\text{п}}^0$ – початкова температура повітря, К.

Система рівнянь була розроблена з урахуванням емпіричних співвідношень для розрахунку питомої швидкості сушки, питомої швидкості осідання крапель на частинках в результаті адгезії, коефіцієнта аксіальної дисперсії частинок, коефіцієнтів теплопередачі, співвідношень для розрахунку втрат матеріалу і товщини шару покриття, а також початкових умов.

Кількість тепла, яка виділяється при видаленні вологи з поверхні крапель, можна переписати наступним чином:

$$M_{\text{п}} v_{\text{суш}} Q_{\text{вип}} = \beta \frac{M_{H_2O} S_{\text{ч}}}{R \Theta_{\text{ч}}} \Delta P Q_{\text{вип}}, \quad (3.4)$$

де β – коефіцієнт масовіддачі, м/с; M_{H_2O} – молекулярна маса води, г/моль; R – універсальна газова стала, $\text{м}^2 \cdot \text{кг} / (\text{с}^2 \cdot \text{К}^1 \cdot \text{моль}^1)$; ΔP – різниця парціальних тисків, Па;

Використовуючи аналітичний зв'язок між парціальним тиском та температурою, останній вираз можна переписати наступним чином:

$$\begin{aligned} \beta \frac{M_{H_2O} S_{\text{ч}}}{R \Theta_{\text{ч}}} \Delta P Q_{\text{вип}} &= \beta \frac{M_{H_2O} S_{\text{ч}}}{R \Theta_{\text{ч}}} Q_{\text{вип}} (P_{\text{к}} - P_{\text{пт}}) = \\ &= \beta \frac{M_{H_2O} S_{\text{ч}}}{R \Theta_{\text{ч}}} Q_{\text{вип}} (\xi_1 \Theta_{\text{к}} - \xi_2 \Theta_{\text{пт}}), \end{aligned} \quad (3.5)$$

де ξ_1, ξ_2 – аналітичні коефіцієнти залежності парціальних тисків від температури, Па/К; $P_{\text{к}}$ – тиск крапель, Па; $P_{\text{пт}}$ – тиск парогазової суміші, Па; $\Theta_{\text{пт}}$ – температура парогазової суміші, К.

Залежність густини крапель розчину від їх температури можна описати наступною формулою:

$$\rho_{\text{к}}(\Theta_{\text{к}}) = \frac{\rho_{\text{к}}^{\text{н.у}} \Theta_{\text{к}}^{\text{н.у}} P_{\text{к}}}{P_{\text{к}}^{\text{н.у}} \Theta_{\text{к}}}, \quad (3.6)$$

де $\rho_{\text{к}}^{\text{н.у}}$ – густина крапель при нормальних умовах, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\Theta_{\text{к}}^{\text{н.у}}$ – температура крапель при нормальних умовах, К; $P_{\text{к}}$ – поточний тиск крапель, Па; $P_{\text{к}}^{\text{н.у}}$ – тиск крапель при нормальних умовах, Па;

Кінцева система рівнянь, що описує процеси в апараті зневоднення та гранулювання має наступний вигляд.

Рівняння зміни температури частинок:

$$M_{\text{ч}} C_{\text{ч}} \frac{d\Theta_{\text{ч}}}{dt} = M_{\text{ч}} C_{\text{ч}} r_{\text{ч}} \Theta_{\text{ч}}^0 + \frac{G_{\text{к}}}{M_{\text{ч}}^0} \cdot \left(\frac{\frac{b_R}{\Theta_{\text{к}}}}{\frac{b_R}{\Theta_{\text{к}}} + 0.35} \right)^2 \cdot M_{\text{ч}} C_{\text{к}} (\Theta_{\text{к}} - \Theta_{\text{ч}}) + \\ + G_{\text{к}} x_{\text{к}} Q_{\text{крисст}} - \frac{\beta_{\text{к}} (\xi_1 \Theta_{\text{к}} - \xi_2 \Theta_{\text{пг}})}{\Theta_{\text{ч}}} + \alpha_{\text{ч}} S_{\text{ч}} (\Theta_{\text{п}} - \Theta_{\text{ч}}). \quad (3.7)$$

Рівняння зміни температури крапель:

$$M_{\text{к}} C_{\text{к}} \frac{d\Theta_{\text{к}}}{dt} = G_{\text{к}} C_{\text{к}} \Theta_{\text{к}}^0 - \frac{G_{\text{к}}}{M_{\text{ч}}^0} \cdot \left(\frac{\frac{b_R}{\Theta_{\text{к}}}}{\frac{b_R}{\Theta_{\text{к}}} + 0.35} \right)^2 \cdot M_{\text{ч}} C_{\text{к}} (\Theta_{\text{к}} - \Theta_{\text{ч}}) + \\ + \frac{\beta_{\text{к}} (\xi_1 \Theta_{\text{к}} - \xi_2 \Theta_{\text{пг}})}{\Theta_{\text{ч}}} + \alpha_{\text{к}} S_{\text{к}} (\Theta_{\text{п}} - \Theta_{\text{к}}) \quad (3.8)$$

Рівняння зміни температури повітря:

$$M_{\text{п}} C_{\text{п}} \frac{d\Theta_{\text{п}}}{dt} = G_{\text{п}} (C_{\text{п}}^0 \Theta_{\text{п}}^0 - C_{\text{п}} \Theta_{\text{п}}) - \alpha_{\text{ч}} S_{\text{ч}} (\Theta_{\text{п}} - \Theta_{\text{ч}}) - \alpha_{\text{к}} S_{\text{к}} (\Theta_{\text{п}} - \Theta_{\text{к}}), \quad (3.9)$$

де $a_R = \frac{G_{\text{к}}}{M_{\text{ч}}^0}$, $b_R = \frac{\rho_{\text{к}}^{\text{н.у}} \Theta_{\text{к}}^{\text{н.у}} P_{\text{к}}}{P_{\text{к}}^{\text{н.у}}} v_{\text{п}} d_{\text{к}}^2$, $\beta_{\text{к}} = \beta \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} S_{\text{ч}}}{R} Q_{\text{виш}} -$ допоміжні коефіцієнти.

Розроблена математична модель враховує гідродинаміку псевдозрідженого шару, явища стикання крапель з частинками та адгезію їх до поверхні, а також кінетику сушіння розчину на поверхні частинок.

Для перевірки правильності складання рівнянь, врахування параметрів взаємодії, акумулюючих ємностей та складових теплового

балансу, було проведено перевірку розмірностей системи диференціальних рівнянь.

Рівняння зміни температури частинок:

$$\begin{aligned} \text{кг} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \frac{\text{К}}{\text{с}} &= \text{кг} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \frac{1}{\text{с}} \text{К} + \frac{1}{\text{с}} (1)^2 \text{кг} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \text{К} + \text{кг} \frac{1}{\text{с}} \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} - \frac{\text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{с} \cdot \text{К}} + \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \text{м}^2 \cdot \text{К} = \\ &= \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} + \frac{\text{Дж}}{\text{с}} + \frac{\text{Дж}}{\text{с}} - \frac{\text{Дж}}{\text{с}} + \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Рівняння зміни температури крапель:

$$\begin{aligned} \text{кг} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \frac{\text{К}}{\text{с}} &= \frac{\text{кг}}{\text{с}} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \text{К} - \frac{1}{\text{с}} (1)^2 \text{кг} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \text{К} + \frac{\text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{с} \cdot \text{К}} + \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \text{м}^2 \cdot \text{К} = \\ &= \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} - \frac{\text{Дж}}{\text{с}} + \frac{\text{Дж}}{\text{с}} + \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Рівняння зміни температури повітря:

$$\begin{aligned} \text{кг} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \frac{\text{К}}{\text{с}} &= \frac{\text{кг}}{\text{с}} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \text{К} - \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \text{м}^2 \cdot \text{К} - \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \text{м}^2 \cdot \text{К} = \\ &= \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} - \frac{\text{Дж}}{\text{с}} - \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \end{aligned}$$

Для отримання динамічних характеристик розробленої системи було використано бібліотеку *Simulink* пакету прикладних програм *Matlab*. За допомогою вбудованих елементів бібліотеки отримано схему системи диференціальних рівнянь, що описують модель об'єкта керування, яку зображено на рисунку 3.1.

З досвіду попередніх аналітичних та практичних досліджень у якості керувального впливу було обрано масову витрату повітря $G_{\text{п}}$. Просимулювавши реакцію системи на зміну керувального впливу $G_{\text{п}}$ за допомогою схеми, тобто розв'язавши систему диференціальних рівнянь динаміки, було отримано перехідні характеристики за каналами «витрати повітря $G_{\text{п}}$ – температура частинок $\Theta_{\text{ч}}$ » (рис. 3.2) та «витрати повітря $G_{\text{п}}$ – температура крапель розчину $\Theta_{\text{к}}$ » (рис. 3.3).

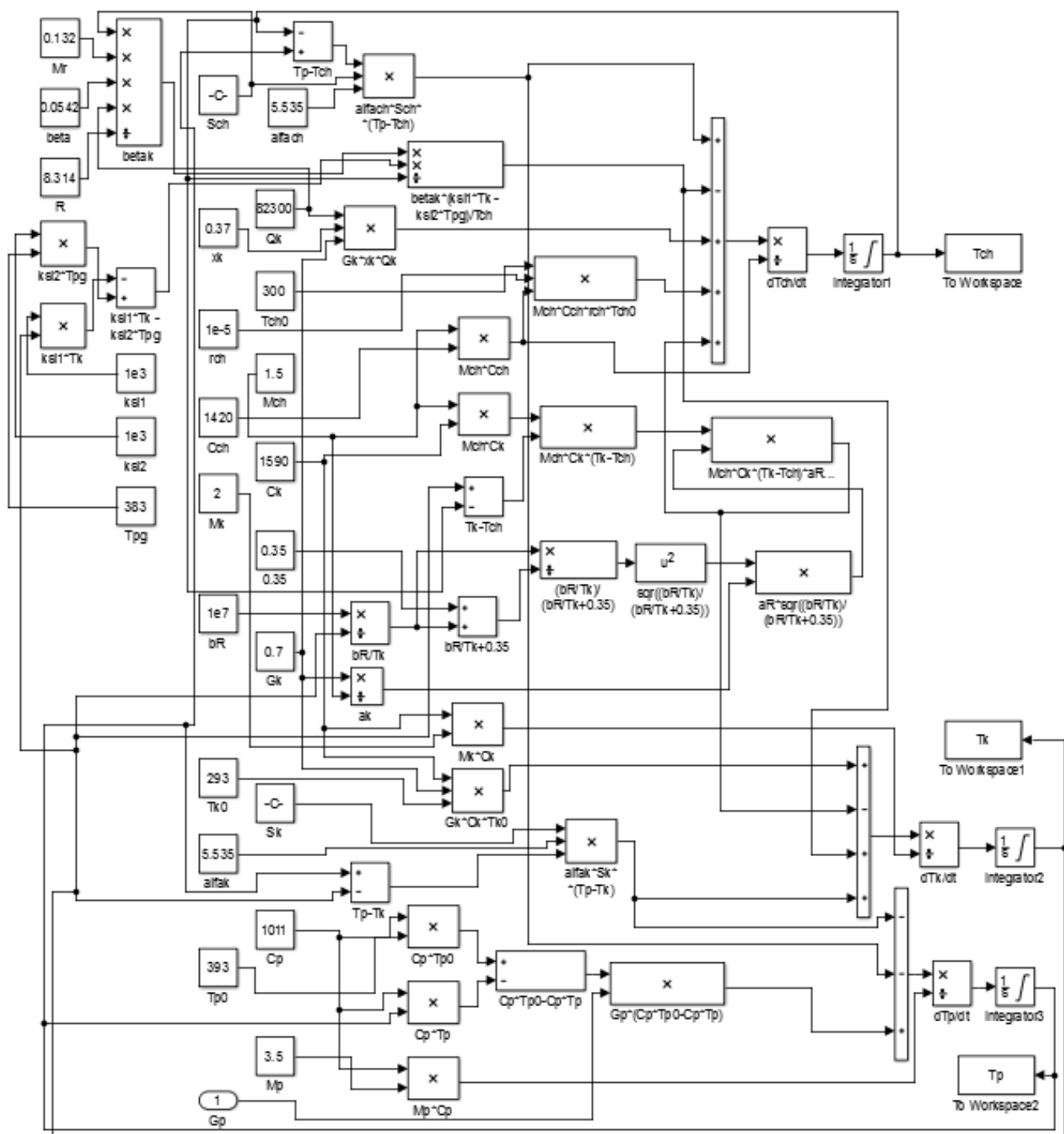


Рис. 3.1. Схема системи диференціальних рівнянь для об'єкта керування

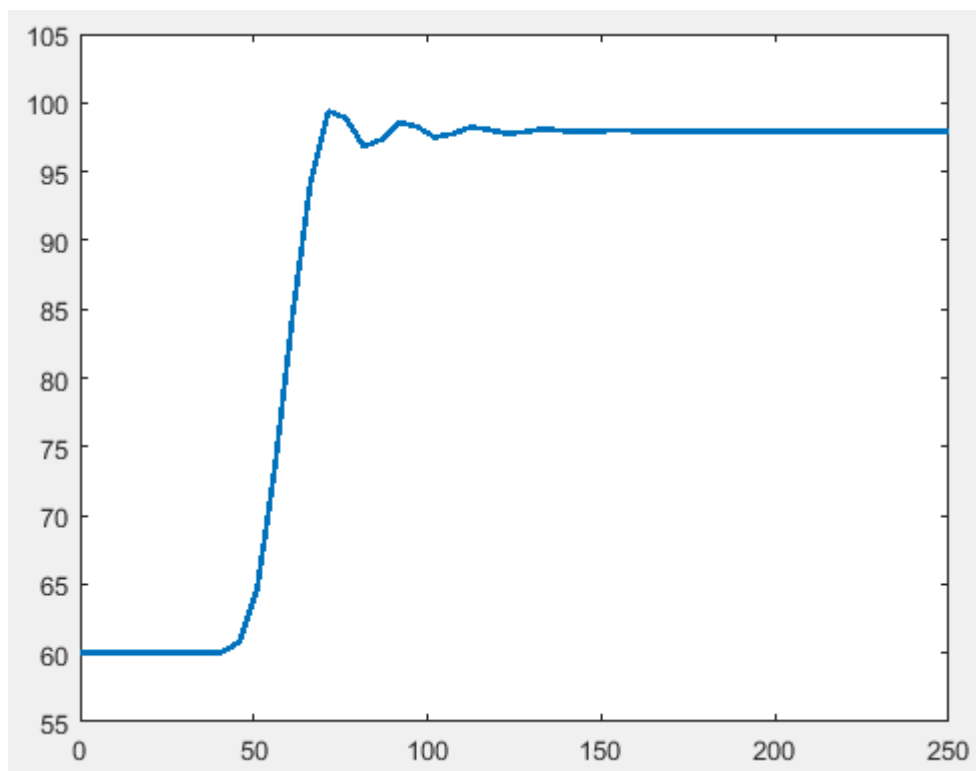


Рис. 3.2. Перехідна характеристика за каналом «витрати повітря G_n – температура частинок Θ_q »

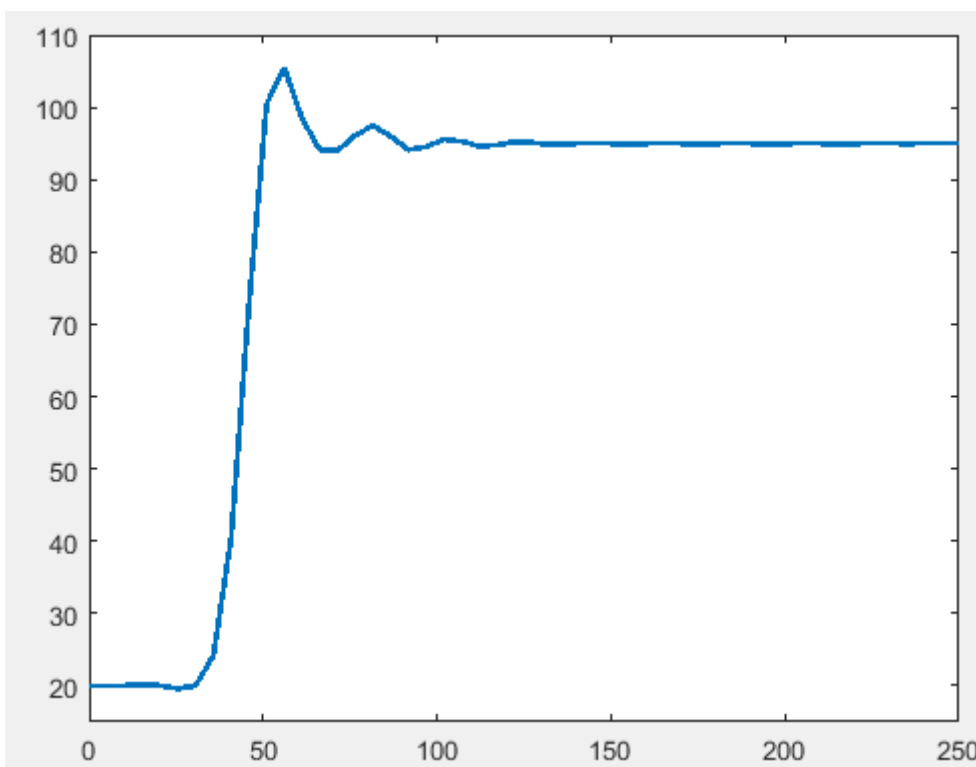


Рис. 3.3. Перехідна характеристика за каналом «витрати повітря G_n – температура крапель розчину Θ_k »

На рисунку 3.4 зображено сукупну залежність температури частинок $\Theta_{\text{ч}}$ та температури крапель розчину $\Theta_{\text{к}}$ від витрати повітря $G_{\text{п}}$ в статичному режимі.

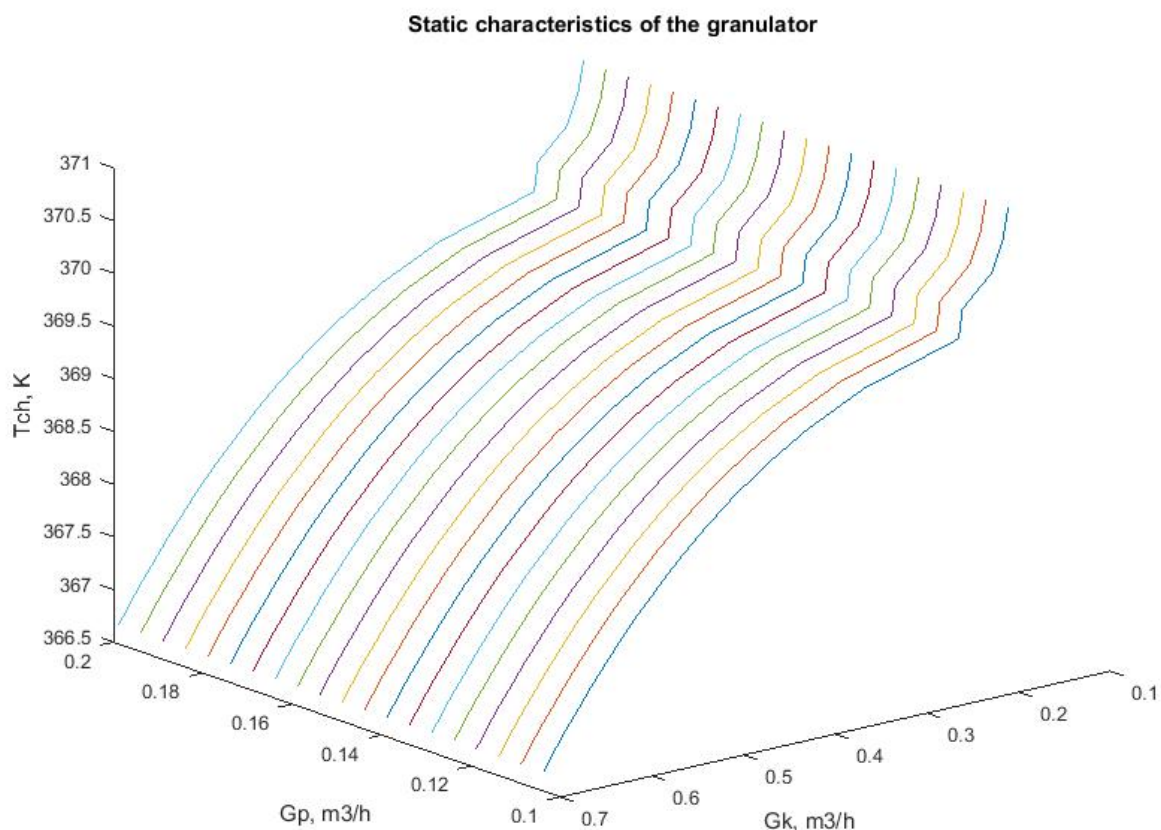


Рис. 3.4. Графік-поверхня залежності температури частинок $\Theta_{\text{ч}}$ та температури крапель розчину $\Theta_{\text{к}}$ від витрати повітря $G_{\text{п}}$

Відомо що підтримання стабільної роботи апаратів із псевдозрідженим шаром та необхідного гідродинамічного режиму в всередині апаратів вимагає розроблення ефективної системи керування процесами зневоднення та гранулювання. При цьому, якість керування розробленої системи керування напряму залежить від точності моделі об'єкта. Результати вищенаведених досліджень дозволяють уточнити модель об'єкта керування та тим самим стати надійним підґрунтям для розробки ефективної системи керування.

3.2. Варіаційне дослідження математичної моделі процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі

Для визначення та дослідження оптимального управління, за допомогою якого може бути досягнута задана мета при мінімізації (максимізації) певного критерію якості системи, необхідно охарактеризувати процес за допомогою адекватної моделі та визначитися з критерієм оптимальності.

Під теорією оптимального управління розуміється деяке узагальнення варіаційного числення і диференціальних рівнянь. Завданням оптимального управління є знаходження оптимального рішення системи диференціальних рівнянь, що залежить від керувального параметра.

Тому, наступним кроком пошуку оптимального керування є представлення моделі у варіаціях.

Проведемо дослідження системи. Нехай $\Theta_{\text{ч}} = x_1$, $\Theta_{\text{к}} = x_2$, $\Theta_{\text{п}} = x_3$, $G_{\text{п}} = u_1$, $G_{\text{к}} = u_2$. Стаціонарні значення змінних позначимо індексом s : x_1^s , x_2^s , x_3^s , u_1^s , u_2^s .

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = a_1 u_2 (x_2 - x_1) + a_2 u_2 - a_3 \frac{x_2}{x_1} + a_4 (x_3 - x_1), \\ \frac{dx_2}{dt} = b_1 u_2 - b_2 u_2 (x_2 - x_1) + b_3 \frac{x_2}{x_1} + b_4 (x_3 - x_2), \\ \frac{dx_3}{dt} = c_1 u_1 + c_2 u_1 x_3 - c_3 (x_3 - x_1) - c_4 (x_3 - x_2). \end{cases} \quad (3.11)$$

Припускаємо, що $x_i = x_i^s + \delta x$, де δx – відхилення від стаціонарного значення. Використовуючи розкладання в ряд Тейлора, отримаємо узагальнюючу формулу:

$$\frac{d\delta x_i}{dt} = f'_{x_1}(x_1, x_2, x_3) \delta x_1 + f'_{x_2}(x_1, x_2, x_3) \delta x_2 + f'_{x_3}(x_1, x_2, x_3) \delta x_3. \quad (3.12)$$

Використавши вищенаведену формулу, перетворимо початкову систему рівнянь до наступного вигляду:

$$\begin{cases} \frac{d\delta x_1}{dt} = (-a_1 u_2 + a_3 \frac{x_2}{x_1^2} - a_4) \delta x_1 + (a_1 u_2 - \frac{a_3}{x_1}) \delta x_2 + (a_4) \delta x_3; \\ \frac{d\delta x_2}{dt} = (b_2 u_2 - b_3 \frac{x_2}{x_1^2}) \delta x_1 + (-b_2 u_2 - \frac{a_3}{x_1} - b_4) \delta x_2 + (b_4) \delta x_3; \\ \frac{d\delta x_3}{dt} = (c_3) \delta x_1 + (c_4) \delta x_2 + (c_2 u_1 - c_3 - c_4) \delta x_3. \end{cases} \quad (3.13)$$

Значення коефіцієнтів системи рівнянь:

$$\begin{aligned} a_1 = b_2 &= \frac{C_k}{C_k M_q^0}; a_2 = \frac{x_q Q_{\text{крист}}}{M_q C_q}; a_3 = b_3 = \frac{\beta_k \xi_1}{M_q C_q}; a_4 = c_3 = \frac{\alpha_q S_q}{M_q C_q}; \\ b_1 &= \frac{\Theta_k^0}{M_k}; b_4 = c_4 = \frac{\alpha_k S_k}{M_k C_k}; \\ c_1 &= \frac{\Theta_{\text{п}}^0}{M_{\text{п}}}; c_2 = \frac{1}{M_{\text{п}}}. \end{aligned}$$

Отримані дослідження можуть бути використанні для визначення характеру перехідного процесу залежно від зміни керувального впливу та дослідження ступеню хаотичності системи. Тобто, ступеню відхилення траєкторій руху системи при різних значеннях вхідних параметрів.

3.3. Дослідження теорії хаосу для випадку псевдозрідження

Наступним кроком після визначення статичних та динамічних характеристик стала робота над проектуванням ефективної системи керування процесом. Треба згадати, що в об'ємі псевдозрідженого шару відбувається інтенсивне перемішування. Під час перемішування частинки рухаються знизу догори, від центра до стінок. Якісне перемішування у псевдозрідженому шарі має велике значення, оскільки призводить до вирівнювання температур та концентрацій, в результаті чого усувається небезпека локального перегрівання. Також підвищення швидкості та якості перемішування зменшує частку речовин, що не охоплені взаємодією і, відповідно, підвищує якісні характеристики готового продукту.

Після вивчення літературних джерел, було з'ясовано, що хаотичне перемішування, зокрема рідин та сипких речовин є важливим напрямком досліджень керованого хаосу. Також вже існують експериментальні та теоретичні дослідження, які доводять наявність детермінованого хаосу у подібних динамічних системах.

Термін управління хаосом зазвичай використовують для визначення області на перетині теорії автоматичного управління і теорії динамічних систем, яка вивчає методи управління детермінованими системами з нерегулярною, хаотичною поведінкою. Динамічна система — це математична абстракція, призначена для опису і вивчення систем, що еволюціонують з часом.

Відомі різноманітні математичні визначення терміна детермінований хаос, але усі вони виражають близькі за типом властивості динамічних систем, пов'язані зі «надчутливістю» до початкових умов: навіть дуже близькі траєкторії з плином часу розходяться на скінченну відстань, тобто прогноз траєкторії на довгий час виявляється неможливим. При цьому кожна траєкторія залишається скінченною, що суперечить широкому розумінню нестійкості при роботі з лінійними системами. Тобто динамічний або детермінований хаос – це явище, коли повністю визначена динамічна система, за відсутності будь-яких випадкових впливів на неї, починає поводитися непередбачуваним (хаотичним) чином. Але у цієї хаотичності при більш заглибленому дослідженні вдається знайти ряд закономірностей. Наприклад, на відміну від класичних випадкових процесів, явище детермінованого хаосу може бути багаторазово повтореним в натурних (повномасштабних) і лабораторних експериментах. Також варто згадати, що нелінійні динамічні системи з подібними властивостями існують у багатьох галузях науки і техніки і не є виключними випадками.

Розглянемо динамічну систему у неперервному вигляді

$$\dot{x} = F(x),$$

де $x = x(t) \in R^n$ – вектор стану системи, $0 \leq t \leq \infty$.

Визначення 1. Замкнута множина $\Omega \in R^n$ називається атрактором системи, якщо

а) існує відкрита множина $\Omega_0 \ni \Omega$ таке, що всі траєкторії $x(t)$ системи, що починаються в Ω_0 , визначені при всіх $t \geq 0$ та прямують до Ω при $t \rightarrow \infty$ (тобто $dist(x(t), \Omega) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, якщо $x(0) \in \Omega_0$, де $dist(x, \Omega) = \inf_{y \in \Omega} \|x - y\|$ – відстань від точки x до множини Ω);

б) ніяка власна підмножина Ω цією властивістю не володіє.

Визначення 2. Атрактор називають хаотичним, якщо він є обмеженим і будь-яка траєкторія, що починається на ньому, нестійка по Ляпунову.

Визначення 3. Система називається хаотичною, якщо у неї існує хоча б один хаотичний атрактор [6].

Нестійкість за Ляпуновим характеризує основну властивість хаотичних коливань, яке називають «надчутливістю», або «чутливою залежністю» від початкових умов: будь-які дуже близькі траєкторії обов'язково віддаляються одна від одної на скінченну відстань.

Хаотичні системи являють собою клас моделей невизначеності, які відрізняються за властивостями й від стохастичних моделей. Стохастична модель (імовірнісна модель) - модель, у якій використовується одна або більше випадкових величин для врахування невизначеності процесу, або в якій вхідні дані будуть представлені відповідно до деякого статистичного розподілу. Якщо в детермінованій системі майбутню траєкторію можна передбачити на будь-який проміжок часу вперед при відомому поточному стані системи, в стохастичній - прогноз неможливий навіть на будь-який малий проміжок часу, то в хаотичній моделі помилка прогнозу

збільшується експоненційно і прогноз можливий лише на обмежений проміжок часу, визначений допустимою похибкою прогнозу.

Отже, якщо розглядати 2 близькі траєкторії динамічної системи x_1, x_2 :

$$\frac{dx}{dt} = f(\bar{x}), \bar{x}_1(0) = \bar{a}, \bar{x}_2(0) = \bar{a} - \bar{\epsilon}. \quad (3.14)$$

То відстань $d(t)$ між спочатку нескінченно близькими траєкторіями буде зростати з часом наближено до наступного експоненціального закону

$$d(t) = |\bar{x}_1(t) - \bar{x}_2(t)| \cong |\bar{\epsilon}| \exp(\lambda t). \quad (3.15)$$

Величина λ називається показником Ляпунова і характеризує горизонт передбачуваності – проміжок часу, на який можливо визначити прогноз поведінки досліджуваної системи. Існує по одному показнику Ляпунова для кожного з вимірів фазового простору. Фазовий простір, або простір станів - простір, на якому безліч всіх станів системи представлено так, що кожному можливому стану системи відповідає одна і тільки одна точка цього простору, – яка носить назву «зображувальної» точки, – і, навпаки, кожній точці цього простору відповідає тільки один стан системи. Таким чином, зміні станів системи, – тобто її динаміці – можна привласнити рух зображувальної точки; траєкторію цієї точки називають фазовою траєкторією (її не слід ототожнювати з дійсною траєкторією руху), а швидкість такої зображає точки називають фазовою швидкістю.

Навіть прості нелінійні моделі дозволяють описувати зміну стану системи залежно від початкових умов. В нашому випадку тривимірну систему для опису процесів у псевдозрідженому шарі обрано, по-перше, через те, що псевдозріджений шар складається саме з трьох фаз (частинки, краплі, повітря), а по-друге тому, що саме таку систему можна об'ємно проілюструвати у тривимірному фазовому просторі, на відміну від 2-вимірної (на площині) та багатовимірної, для якої недостатньо координат, які людина може сприйняти візуально.

Формально показники Ляпунова динамічної системи $\frac{d\bar{x}}{dt} = f(x)$

визначаються виразом:

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln |\tilde{x}_i(t)|, \quad (3.16)$$

де $\tilde{x}_i(t)$ - і-ті власні значення матриці, складеної з перших частинних похідних від вектор-функції компонентами вектора x (матриці Якобі – Якобіана).

Додатній показник Ляпунова характеризує розтягнення фазового простору, або швидкість розбігання близьких точок. Від’ємний показник Ляпунова відображає стискання, тобто швидкість, з якою система відновлюється після збурення [19].

Впорядкований за спаданням такий набір показників утворює спектр показників Ляпунова $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ і дозволяє класифікувати атрактори. Атрактор — це множина точок у фазовому просторі, до якої збігаються фазові траєкторії дисипативної системи при часі, що прямує до нескінченності. Дисипативна система – це стійкий стан, що виникає в нерівноважному середовищі за умови дисипації (розсіювання) енергії, яка надходить ззовні. З появою складної впорядкованої структури в системі зростає ентропія, яка компенсується негативним потоком ентропії зовні. Також може називатися нерівноважною або стаціонарною відкритою системою. Усі реальні системи є дисипативними.

Атрактори різних систем можуть бути наступних типів:

Табл. 3.2 – Типи атракторів

Тип атрактора	Розмірність фазового простору	Знаки показників Ляпунова
Нерухома точка (фокус, вузол)	1	(–)

Нерухома точка (фокус, вузол)	2	$(-, -)$
Граничний цикл	2	$(0, -)$
Нерухома точка (фокус, вузол)	3	$(-, -, -)$
Граничний цикл	3	$(0, -, -)$
Стійкий інваріантний двовимірний тор	3	$(0, 0, -)$
Дивний атрактор	3	$(+, 0, -)$

Для розробки ефективної системи керування процесом зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі було прийняте рішення визначити ступінь хаотичності процесу перемішування у даній системі. Тобто, визначити для неї показники Ляпунова. Варто зазначити, що для більшості динамічних систем розрахунок показника Ляпунова можливий лише чисельно. Тому для визначення показників Ляпунова в досліджуваній системі було використано один з алгоритмів їх чисельного розрахунку – алгоритм Вольфа. Цей метод базується на чисельному розв’язанні системи диференціальних рівнянь спільно з рівняннями в варіаціях, які описують нескінченно малу зміну траєкторії. Тобто розглядаються дві траєкторії, віддалені одна від одної на малу відстань $R_0 = \varepsilon$, яке через певний проміжок часу δt досягає значення R_1 . Максимальний показник Ляпунова на кожному кроці знаходиться за формулою $\lambda = \log|R/R|/\delta t$ [5]. Зі збільшенням часу обчислення розрахункове значення показника Ляпунова наближається до реального.

Для реалізації цього алгоритму було використано програмне середовище математичного пакета *MATLAB* та додаток для чисельного аналізу динамічних систем *MATDS*. Досліджувана система задається окремою функцією, в яку передаються параметри системи, початкові значення змінних та час розрахунку. В тілі функції задаються праві

частини та якобіан системи, на основі яких формуються рівняння в варіаціях.

Пошук показників Ляпунова відбувається в окремій функції, в яку передаються параметри досліджуваної системи та параметри солвера диференціальних рівнянь. На початку програми відбувається ініціалізація необхідних допоміжних змінних, далі – числове розв’язання системи з рівняннями у варіаціях, які дозволяють визначити відхилення траєкторій, в наступному блоці – нормування рішення системи (ортогоналізація Грама-Шмідта), що дозволяє виділити показники Ляпунова та виключити вплив старшого показника на молодші. Після цього обраховуються суми ортогоналізованих відхилень, а далі, в основному циклі знаходять показники Ляпунова нормуванням сум відхилень за часом. Цикл продовжується багаторазово, що дозволяє максимально наблизити розраховані величини до реальних значень показників Ляпунова.

Під час досліджень було отримано наступну динаміку показників Ляпунова:

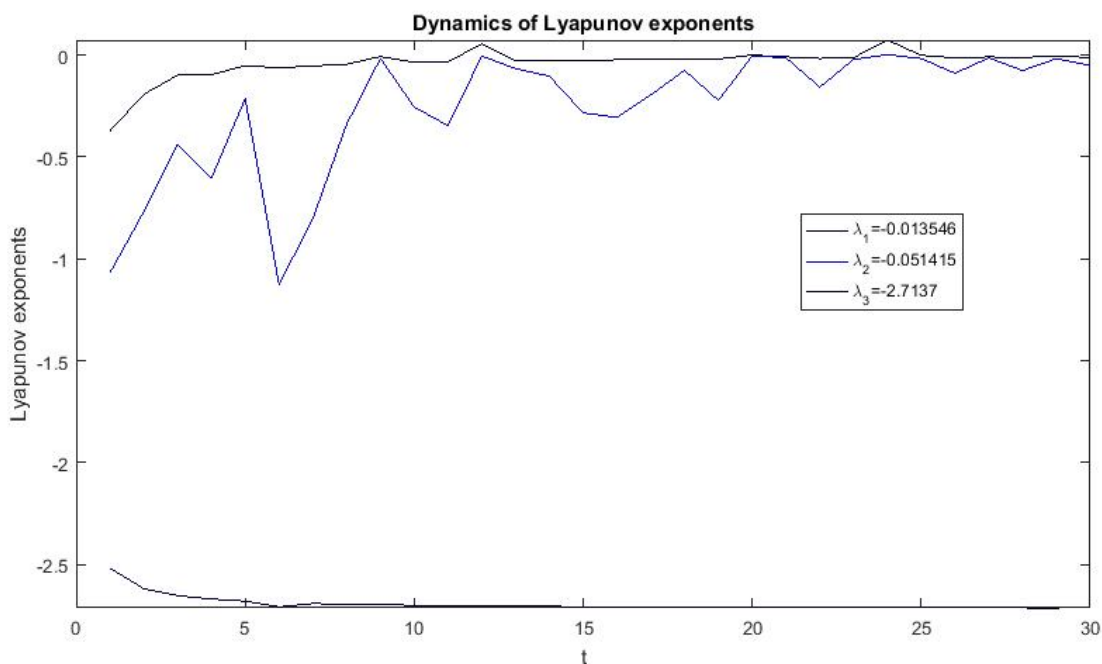


Рис 3.5. Показники Ляпунова досліджуваної системи

Також було побудовано атрактор системи.

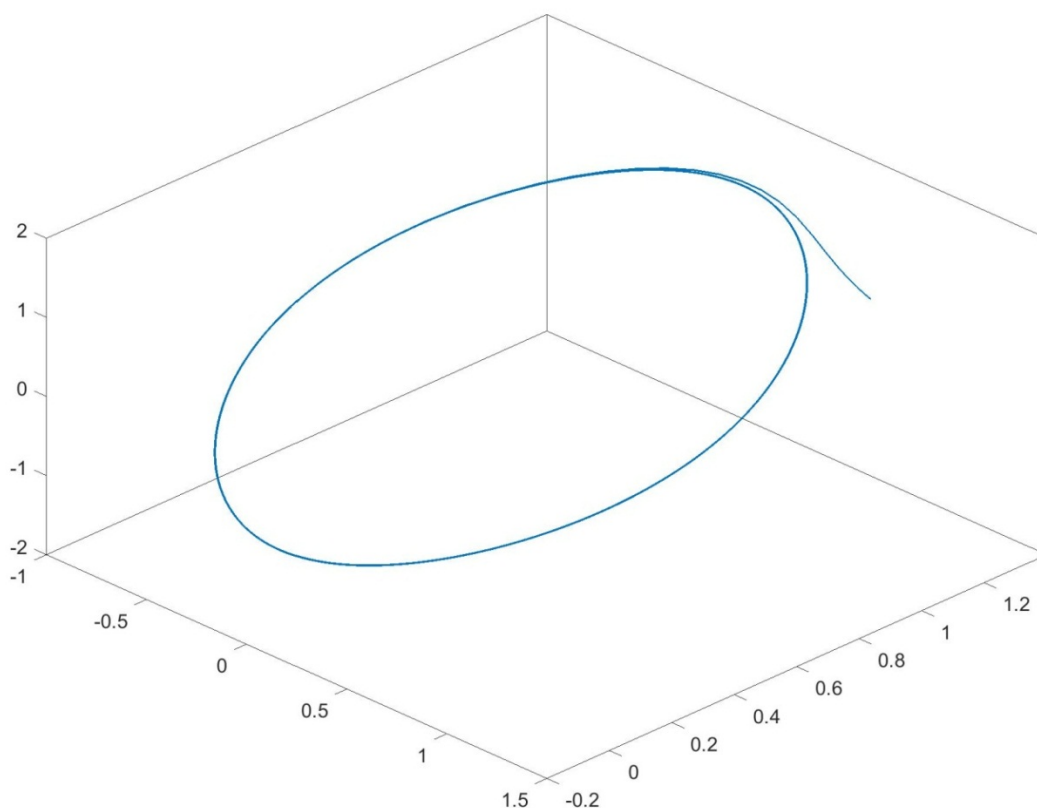


Рис. 3.6. Атрактор досліджуваної системи

Отримані результати свідчать про те, що досліджувана система при певних значеннях вхідних параметрів має стійкий граничний цикл – замкнену криву, що відповідає періодичним процесам, в околі яких відбуваються коливальні перехідні процеси. Фізичний сенс стійкого ГЦ – незгасаючі коливання керованої величини при відсутності зовнішніх гармонійних впливів. Параметри коливань (амплітуда і частота) не залежать від початкових умов, а визначаються лише внутрішніми властивостями системи. Це означає, що для підтримки активного режиму перемішування, можна відповідним чином керувати малою зміною вхідних параметрів системи G_p , G_k – витратами повітря та розчину, щоб забезпечувати періодичну втрату стійкості граничного циклу (це ще називають сценарієм Рюеля-Такенса) і перехід до хаосу. В результаті чого

вигляд атрактора системи поступово наближається до інваріантного двомірного тора.

4. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ХАОСОМ

4.1. Актуальність системи керування хаосом у грануляторі псевдозрідженого шару

Основною метою керування в процесі зневоднення та гранулювання було обрано підвищення швидкості та інтенсивності, тобто покращення перемішування за рахунок збільшення ступеня хаотичності процесу. Тобто, приведення системи в стан так званих пульсацій (коливань), що є обмеженими таким чином, щоб система не втратила стійкості та не стала повністю хаотичною.

Такий підхід обумовлено тим, що результатом інтенсивного перемішування частинок є певне вирівнювання концентрацій (градієнт концентрацій майже зникає) та температурного поля по об'єму шару, покращення «текучості», збільшення однорідності шару і, як наслідок, покращення процесів міжфазного тепло- та масопереносу (про що говорять збільшення коефіцієнтів тепло- та масопередачі), урівноваження взаємовпливу всіх компонентів псевдозрідження один на одний, зменшення сили зчеплення частинок між собою і, як наслідок, попередження утворення агломератів. Також це зниження ризику залипання газорозподільної решітки, а отже й виникнення аварійної ситуації в апараті.

Тобто, якість перемішування безпосередньо впливає на якість (гранулометричний склад) готового продукту, відсоток браку та вірогідність виникнення аварійних ситуацій в апараті.

4.2. Розробка системи керування хаосом

Розглянемо раніше перетворену модель гранулятора з псевдозрідженим шаром:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = a_1 u_2 (x_2 - x_1) + a_2 u_2 - a_3 k + a_4 (x_3 - x_1) \\ \frac{dx_2}{dt} = b_1 u_2 - b_2 u_2 (x_2 - x_1) + b_3 k + b_4 (x_3 - x_2) \\ \frac{dx_3}{dt} = c_1 u_1 + c_2 u_1 x_3 - c_3 (x_3 - x_1) - c_4 (x_3 - x_2) \end{cases} \quad (4.1)$$

На початку розробки системи керування на її основі отримано модель об'єкта у варіаціях за вищенаведеним алгоритмом:

$$\begin{cases} \frac{d\delta x_1}{dt} = (-a_1 u_2 - a_4) \delta x_1 + (a_1 u_2) \delta x_2 + (a_4) \delta x_3; \\ \frac{d\delta x_2}{dt} = (b_2 u_2) \delta x_1 + (-b_2 u_2 - b_4) \delta x_2 + (b_4) \delta x_3; \\ \frac{d\delta x_3}{dt} = (c_3) \delta x_1 + (c_4) \delta x_2 + (c_2 u_1 - c_3 - c_4) \delta x_3. \end{cases}$$

Критерій оптимальності обрано виходячи з кінцевої мети – варіація параметру x_1 має бути максимальною

$$I = -\delta x_1(t_f) \rightarrow \min. \quad (4.2)$$

Розрахуємо Гамільтоніан:

$$\begin{aligned} H = & \chi_1((-a_1 u_2 - a_4) \delta x_1 + (a_1 u_2) \delta x_2 + (a_4) \delta x_3) + \\ & + \chi_2((b_2 u_2) \delta x_1 + (-b_2 u_2 - b_4) \delta x_2 + (b_4) \delta x_3) + \\ & + \chi_3((c_3) \delta x_1 + (c_4) \delta x_2 + (c_2 u_1 - c_3 - c_4) \delta x_3) - \frac{d\delta x_1(t_f)}{dt}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Тоді умови оптимальності розраховуються наступним чином:

$$\begin{aligned} \chi_1' &= -\frac{\partial H}{\partial(\delta x_1)} = -\chi_1(-a_1 u_2 - a_4) - \chi_2 b_2 u_2 - \chi_3 c_3 - \frac{d\delta x_1(t_f)}{dt}, \\ \chi_2' &= -\frac{\partial H}{\partial(\delta x_2)} = -\chi_1 a_1 u_2 - \chi_2(-b_2 u_2 - b_4) - \chi_3 c_4, \\ \chi_3' &= -\frac{\partial H}{\partial(\delta x_3)} = -\chi_1 a_4 - \chi_2 b_4 - \chi_3(c_2 u_1 - c_3 - c_4). \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u_1} = \chi_3 c_2 \delta x_3, \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial H}{\partial u_2} = \chi_1 a_1 (\delta x_2 - \delta x_1) + \chi_2 b_2 (\delta x_1 - \delta x_2) + \chi_3 c_2 \delta x_3. \quad (4.6)$$

В якості керувального впливу ми розглядаємо параметр u_1 – витрати повітря. Тому, виходячи з того, що частинна похідна від функції Гамільтона по параметру u_1 не містить компоненти з u_1 , можемо перейти до керування наступного вигляду:

$$\Delta u_1 = -\gamma \cdot \text{sign}(\lambda_3 c_2 \delta x_3). \quad (4.7)$$

Це позиційне регулювання, що змінює перехідну характеристику об'єкта в межах 10 % від усталеного режиму. Воно спрацьовує, коли перехідний процес в системі стає усталеним.

Таким керувальним впливом ми «розгойдуємо» систему для отримання пульсацій, але при цьому обмежуємо амплітуду коливань за допомогою параметра $\gamma = 0 \dots 1$, щоб система не втрачала стійкості.

Наступним кроком визначимо графічно з системи диференціальних рівнянь значення u_1 , при яких змінюється характер перехідного процесу у системі (рис. 4.1-4.3). Оскільки найбільше витрати пари u_1 впливають на температуру пари x_3 , то найбільш раціонально проаналізувати зміни характеру процесу за зміною перехідного процесу по температурі пари.



Рис. 4.1. Перехідний процес по змінній x_3 – температурі пари при $u_1 = 0,5$.

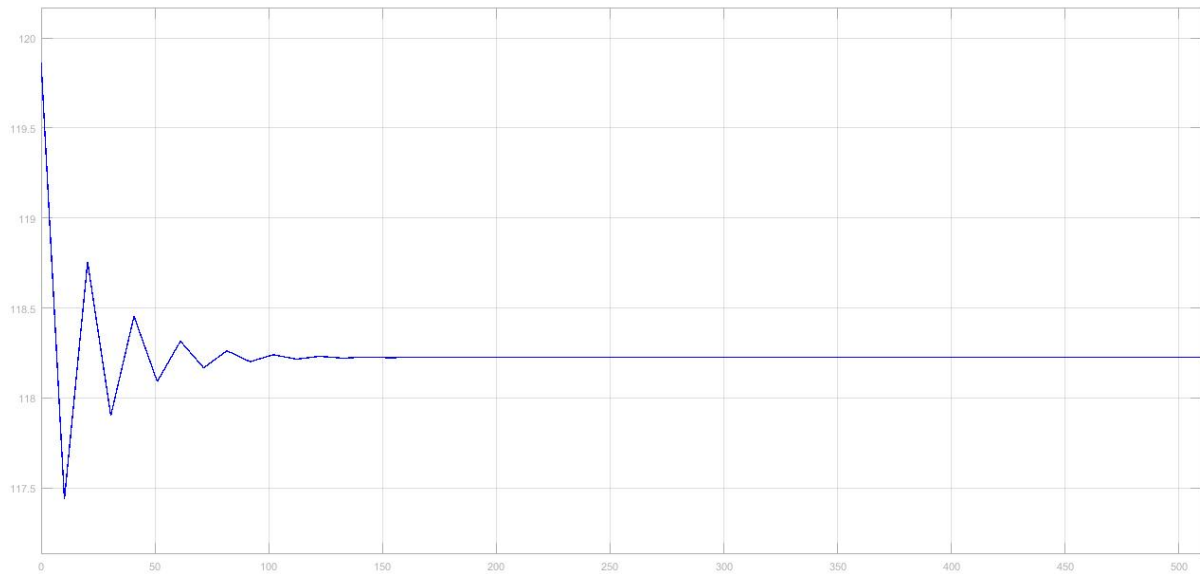


Рис. 4.2. Перехідний процес по змінній x_3 – температурі пари при $u_1 = 0,75$.

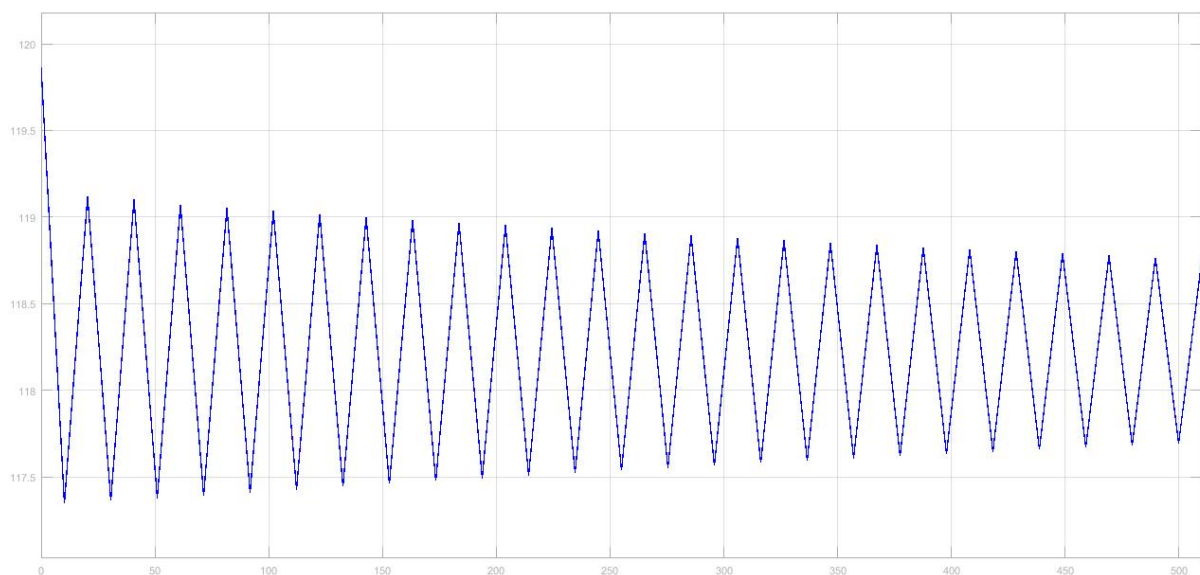


Рис. 4.3. Перехідний процес по змінній x_3 – температурі пари при $u_1 = 0,86$.

Тобто, при $u_1 = 0,86$ в системі є помітні коливання, що, тим не менше, сходяться. Далі дослідимо поведінку λ_1 при різних значеннях u_1 , розв'язавши систему отриманих з умов оптимальності диференціальних рівнянь першого порядку.

Для цього використаємо програмне середовище математичного пакета Matlab, де систему диференціальних рівнянь задаємо у вигляді функції:

```
function f=lambda(t,L)

%u1=0.5...0.86%
%t=1000%

a1=0.667; a4=0.018;
b4=0.012;
c2=0.286;
u1=0.5; u2=0.1;

f=[L(1)*(a1*u2+a4)-L(2)*a1*u2-L(3)*a4;
   -L(1)*a1*u2-L(2)*(-a1*u2-b4)-L(3)*a4;
   -L(1)*a4-L(2)*b4-L(3)*(c2*u1-a4-b4)];
```

Розв'язуємо систему рівнянь за допомогою вбудованого солвера *ode45*:

```
function dynpoint_lambda()

[t,h]=ode45(@lambda,[0,20],[0.1,0.1,0.1]);

L=h(:,1);
y=h(:,2);

plot(L,y);
hold on
```

Результати розв'язання системи диференціальних рівнянь для різних u_1 представлено на рисунку 6.4.

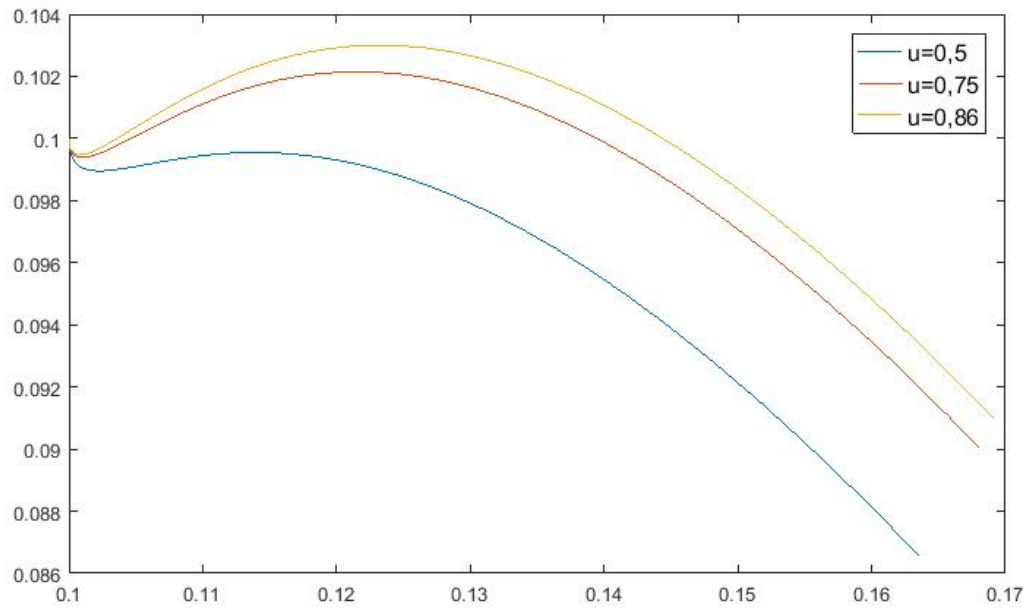


Рис. 4.4. Розв'язок системи диференціальних рівнянь для λ_1 при різних значеннях u_1

Зміну критерію оптимальності I при зміні керування u_1 можна розрахувати використавши отримані дані та додаток для чисельного аналізу динамічних систем *MATDS*.

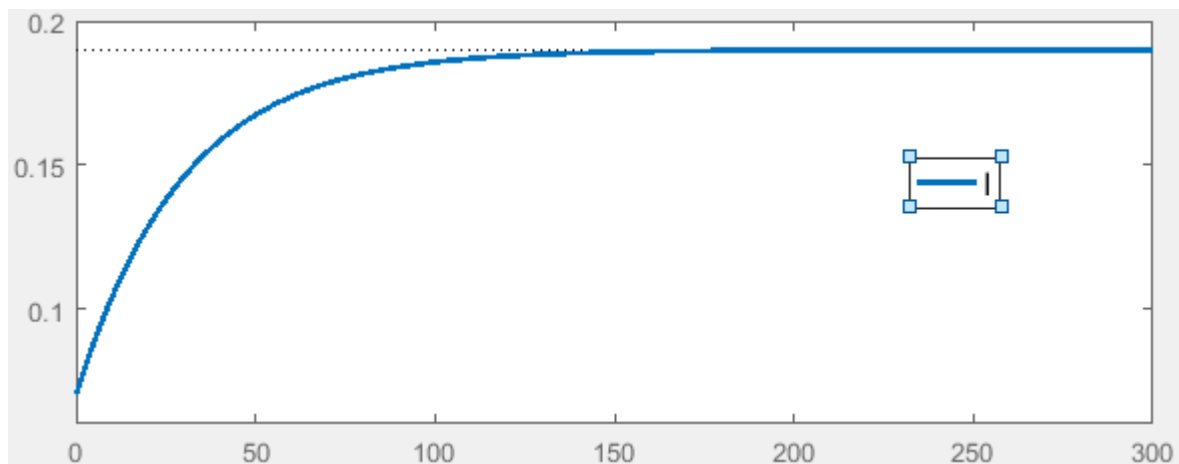


Рис. 4.5. Зміна критерію оптимальності

4.3. Результати роботи системи керування

Для проектування системи позиційного керування хаосом скористаємось середовищем *Simulink Matlab*. Передавальну функцію

об'єкта, що включає узагальнену передавальну функцію за каналом «витрати пари – температура псевдозрідженого шару» та передавальну функцію виконавчого механізму задаємо за допомогою блоків *Transfer Function* та *Transport Delay* вбудованої бібліотеки *Simulink*. У якості перемикача виступає блок *Relay*, а умови для перемикання перевіряються в блоці *S-Function*, що заданий програмно. Також на схемі присутній перемикач вхідних сигналів *Manual Switch*, сигнали завдання *Step* та *Uniform Random Signal* та майстер побудови графіків *Scope*.

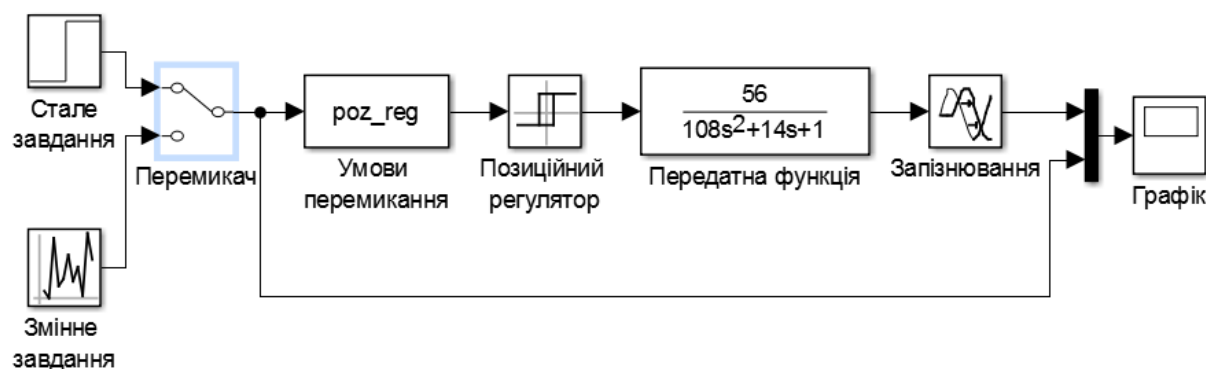


Рис. 4.6. Схема системи керування хаосом зі підключеним сталим сигналом завдання

Спочатку перемикач вхідних сигналів під'єднує до системи одиничний ступінчастий сигнал. Після запуску симуляції отримуємо наступну перехідну характеристику:

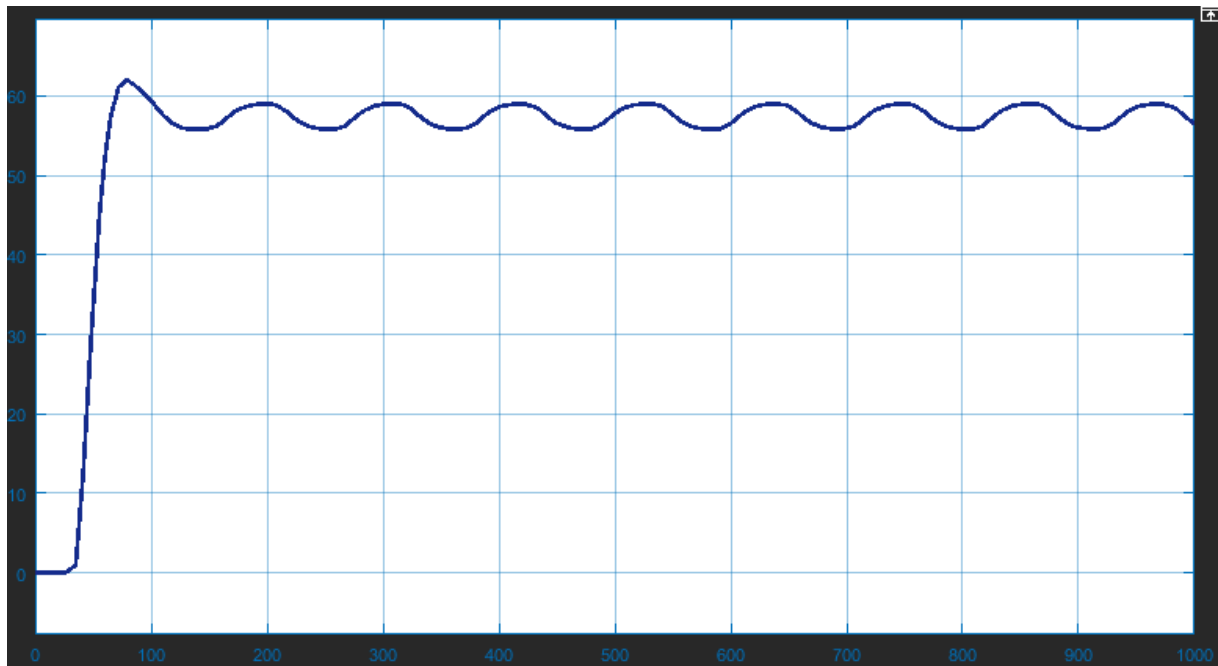


Рис. 4.7. Результат роботи системи керування при сталому сигналі завдання

Далі за допомогою перемикача під'єднуємо до схеми змінний сигнал завдання, що варіюється в межах $\pm 20\%$ від режимного значення.

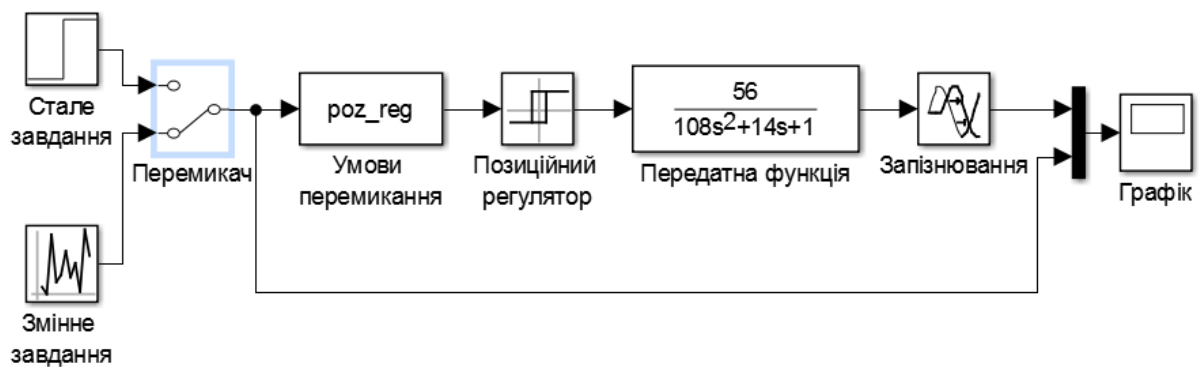


Рис. 4.8. Схема системи керування хаосом зі змінним сигналом завдання

Після запуску симуляції отримуємо наступні графіки:

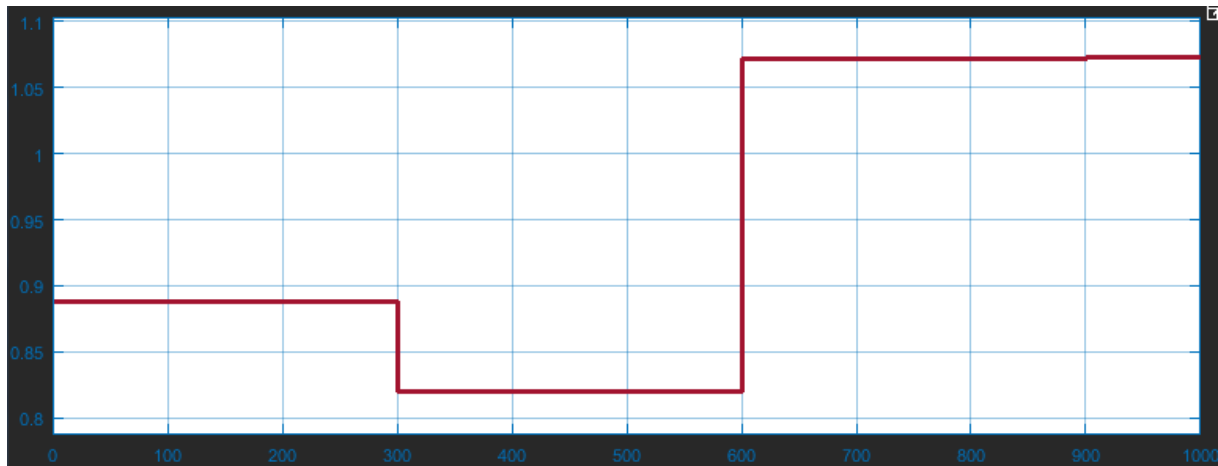


Рис. 4.9. Зміна сигналу завдання

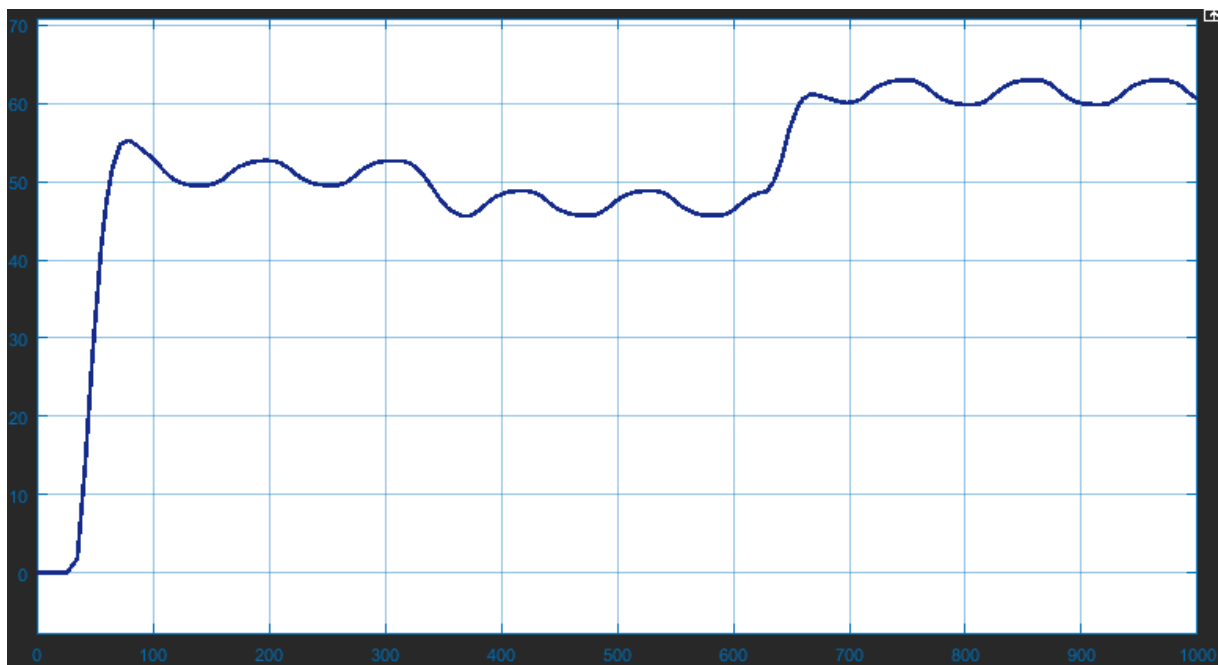


Рис. 4.10. Результат роботи системи керування при змінному сигналі завдання

Отже, використовуючи позиційне регулювання на вдалося ініціювати пульсації в системі керування, не позбавивши її при цьому стійкості.

Іншими перевагами використання позиційних регуляторів зокрема в нашому процесі є:

- простота конструкції, а отже й легкість проектування системи на реальному виробництві;

- легкість налаштування, оскільки позиційний регулятор не містить параметрів, що потребують налаштування висококваліфікованими спеціалістами;
- легкість у використанні та обслуговуванні;
- економічність, пов'язана з дискретним періодичним регулюванням.

Тому за результатами досліджень, саме такий спосіб регулювання було обрано для нашого об'єкту – гранулятора псевдозріженого шару.

5. РОЗРОБКА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗНЕВОДНЕННЯ ТА ГРАНУЛЮВАННЯ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

5.1. Визначення об'єкта керування

Розглянемо структурно-параметричну схему гранулятора (рис. 5.1). У якості регульованої величини обираємо температуру псевдозрідженого шару, що визначимо за емпіричною адитивною формулою: $\Theta_{\text{пш}} = 0,452 \cdot \Theta_{\text{ч}} + 0,558 \cdot \Theta_{\text{к}}$. Керувальними діями в даному випадку можуть виступати або витрати повітря $G_{\text{п}}$, або витрати початкового розчину $G_{\text{к}}$, оскільки обидва ці параметри значно впливають на перебіг процесу та кінцевий продукт. Обираємо в якості керувального впливу витрату початкового розчину $G_{\text{к}}$.

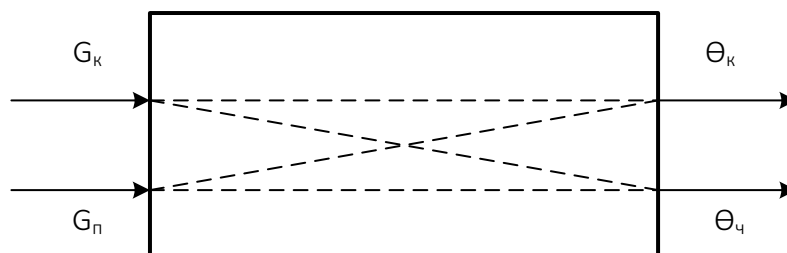


Рис. 5.1. Структурно-параметрична схема гранулятора

Для подальших розрахунків лінеаризуємо рівняння динаміки.

Після лінеаризації та алгебраїчних перетворень отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d\Theta_{\text{ч}}(t)}{dt} = a_{11}\Theta_{\text{ч}}(t) + a_{12}\Theta_{\text{к}}(t) + a_{13}\Theta_{\text{п}}(t) + b_1G_{\text{к}}(t), \\ \frac{d\Theta_{\text{к}}(t)}{dt} = a_{21}\Theta_{\text{ч}}(t) + a_{22}\Theta_{\text{к}}(t) + a_{23}\Theta_{\text{п}}(t) + b_2G_{\text{к}}(t), \\ \frac{d\Theta_{\text{п}}(t)}{dt} = a_{31}\Theta_{\text{ч}}(t) + a_{32}\Theta_{\text{к}}(t) + a_{33}\Theta_{\text{п}}(t) + b_3G_{\text{к}}(t). \end{cases} \quad (5.1)$$

Тобто, переходимо до представлення математичної моделі у вигляді:

$$\frac{dX(t)}{dt} = AX + BU, \quad (5.2)$$

$$\text{де } X^m = [\Theta_{\text{ч}} \Theta_{\text{к}} \Theta_{\text{п}}]$$

$$a_{11} = \frac{M_{\text{ч}} N_{\text{ч}} C_{\text{ч}} r_{\text{ч}} - \alpha_{\text{ч}} N_{\text{ч}} F_{\text{ч}} - R^{\text{адг}} M_{\text{ч}} N_{\text{ч}} C_{\text{к}}}{M_{\text{ч}} N_{\text{ч}} C_{\text{ч}}} = -0,396;$$

$$a_{12} = \frac{R^{\text{адг}} M_{\text{ч}} N_{\text{ч}} C_{\text{к}}}{M_{\text{ч}} N_{\text{ч}} C_{\text{ч}}} = 0,4;$$

$$a_{13} = \frac{\alpha_{\text{ч}} N_{\text{ч}} F_{\text{ч}}}{M_{\text{ч}} N_{\text{ч}} C_{\text{ч}}} = 0,00184;$$

$$a_{21} = a_{23} = 0;$$

$$a_{22} = \frac{G_{\text{к}} C_{\text{к}} - R^{\text{адг}} M_{\text{ч}} N_{\text{ч}} C_{\text{к}} - \alpha_{\text{к}} N_{\text{к}} F_{\text{к}}}{M_{\text{к}} N_{\text{к}} C_{\text{к}}} = -0,00116;$$

$$a_{31} = \frac{\alpha_{\text{ч}} N_{\text{ч}} F_{\text{ч}}}{M_{\text{п}} C_{\text{п}}} = 0,0011;$$

$$a_{32} = \frac{\alpha_{\text{к}} N_{\text{к}} F_{\text{к}}}{M_{\text{п}} C_{\text{п}}} = 0,00106;$$

$$a_{33} = -\frac{G_{\text{п}} C_{\text{п}} + \alpha_{\text{ч}} N_{\text{ч}} F_{\text{ч}} + \alpha_{\text{к}} N_{\text{к}} F_{\text{к}}}{M_{\text{п}} C_{\text{п}}} = -0,016;$$

$$b_1 = b_3 = 0;$$

$$b_2 = \frac{C_{\text{к}} \Theta_{\text{к}}}{M_{\text{к}} N_{\text{к}} C_{\text{к}}} = 182.$$

За допомогою програмного пакету *MatLab* отримаємо перехідні характеристики об'єкта, розв'язавши отримані лінеаризовані диференціальні рівняння.

Задаємо у вигляді функції систему диференціальних рівнянь:

```
function f=hello(t,y)
```

```
% задаємо коефіцієнти системи рівнянь
```

```
a11=-0.396; a12=0.4; a13=0.00184;
```

```
a21=0; a22=-0.00116; a23=0; b2=182;
```



```

a31=0.0011; a32=0.00106; a33=-0.016;
% dX-приріст керувального впливу;
dX=1;
% формуємо функцію
f=[a11*y(1)+a12*y(2)+a13*y(3);
    a21*y(1)+a22*y(2)+a23*y(3)+b21*dX;
    a31*y(1)+a32*y(2)+a33*y(3)];

```

Вирішуємо систему, перераховуючи отриману функцію за допомогою солвера.

```

function dynpoint()
Y0=[98; 95; 120]
[t,Y]=ode45(@hello,[0,500],Y0);
y1=Y(:,1); % масив значень Тч
y2=Y(:,2); % масив значень Тк
y3=Y(:,3); % масив значень Тп
plot(t,y1,t,y2,t,0.232*y1+0.768*y2);

```

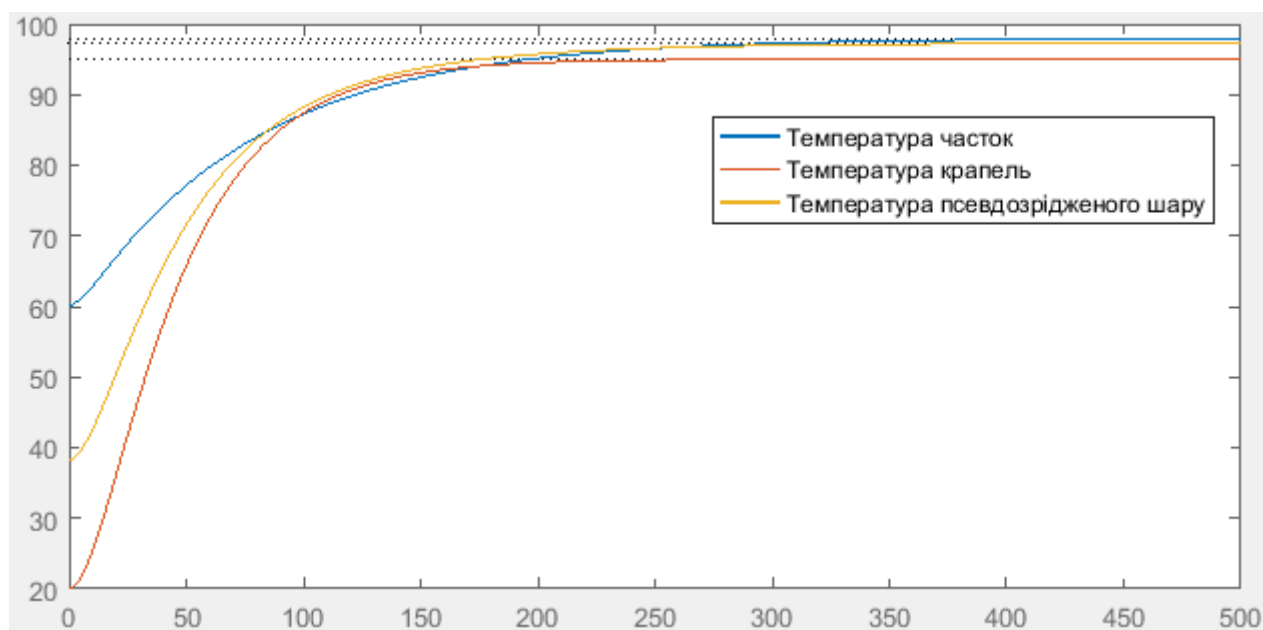


Рис 5.2. Перехідні характеристики об'єкта керування

5.2. Вибір критерію оптимальності

Для вирішення задачі оптимального керування процесом обираємо квадратичний критерій якості, який висуває вимогу підтримання на певному рівні температури псевдозрідженого шару при мінімізації витрати початкового розчину:

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{tf} \left[q \left(\Theta_{\text{пш}} - \Theta_{\text{пш}}^{\text{зад}} \right)^2 + r G_{\text{к}}^2 \right] dt \rightarrow \min. \quad (5.3)$$

5.3. Необхідні умови оптимальності

Функція Гамільтона має вигляд:

$$\begin{aligned} H = & \frac{1}{2} \left[q \left(\Theta_{\text{пш}} - \Theta_{\text{пш}}^{\text{зад}} \right)^2 + r G_{\text{к}}^2 \right] + \lambda_1 (a_{11} \Theta_{\text{ч}} + a_{12} \Theta_{\text{к}} + a_{13} \Theta_{\text{п}} + b_1 G_{\text{к}}) + \\ & + \lambda_2 (a_{21} \Theta_{\text{ч}} + a_{22} \Theta_{\text{к}} + a_{23} \Theta_{\text{п}} + b_2 G_{\text{к}}) + \\ & + \lambda_3 (a_{31} \Theta_{\text{ч}} + a_{32} \Theta_{\text{к}} + a_{33} \Theta_{\text{п}} + b_3 G_{\text{к}}) = \\ & \frac{1}{2} \left[q \left(0,054 \cdot \Theta_{\text{ч}}^2 + 2 \cdot \Theta_{\text{ч}} \Theta_{\text{к}} + 0,059 \cdot \Theta_{\text{к}}^2 - \right. \right. \\ & \left. \left. - 2 \cdot \Theta_{\text{пш}}^{\text{зад}} (0,232 \cdot \Theta_{\text{ч}} + 0,768 \cdot \Theta_{\text{к}}) + \left(\Theta_{\text{пш}}^{\text{зад}} \right)^2 \right) + r G_{\text{к}}^2 \right] + \\ & + \lambda_1 (a_{11} \Theta_{\text{ч}} + a_{12} \Theta_{\text{к}} + a_{13} \Theta_{\text{п}}) + \\ & + \lambda_2 (a_{22} \Theta_{\text{к}} + b_2 G_{\text{к}}) + \lambda_3 (a_{31} \Theta_{\text{ч}} + a_{32} \Theta_{\text{к}} + a_{33} \Theta_{\text{п}}) \end{aligned} \quad (5.4)$$

Умови оптимальності:

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_1' &= -\frac{dH}{d\Theta_{\text{ч}}} = -q(0.054 \cdot \Theta_{\text{ч}} + \Theta_{\text{к}} - 0.232 \cdot \Theta_{\text{пш}}^{\text{3ад}}) - \lambda_1 a_{11} - \lambda_3 a_{31}, \\ \lambda_2' &= -\frac{dH}{d\Theta_{\text{к}}} = -q(0.059 \cdot \Theta_{\text{к}} + \Theta_{\text{ч}} - 0.768 \cdot \Theta_{\text{пш}}^{\text{3ад}}) - \\ &\quad - \lambda_1 a_{12} - \lambda_2 a_{22} - \lambda_3 a_{32}, \\ \lambda_3' &= -\frac{dH}{d\Theta_{\text{п}}} = -\lambda_1 a_{13} - \lambda_3 a_{33}. \end{aligned} \right. \quad (5.4)$$

$$\lambda_1(t_f) = \lambda_2(t_f) = \lambda_3(t_f) = 0. \quad (5.5)$$

$$\frac{dH}{dG_{\text{к}}} = rG_{\text{к}} + \lambda_2 b_2 = 0. \quad (5.6)$$

$$G_{\text{к}}^* = -\frac{b_2}{r} \lambda_2 \quad (5.7)$$

Рівняння системи в прямому часі:

$$\begin{aligned} \frac{\Theta_{\text{ч}}^{v+1} - \Theta_{\text{ч}}^v}{\tau} &= a_{11}\Theta_{\text{ч}} + a_{12}\Theta_{\text{к}} + a_{13}\Theta_{\text{п}} \\ \Theta_{\text{ч}}^{v+1} - \Theta_{\text{ч}}^v &= \tau(a_{11}\Theta_{\text{ч}} + a_{12}\Theta_{\text{к}} + a_{13}\Theta_{\text{п}} + b_1 G_{\text{к}}) \\ \frac{\Theta_{\text{к}}^{v+1} - \Theta_{\text{к}}^v}{\tau} &= a_{22}\Theta_{\text{к}} + b_2 G_{\text{к}} \\ \Theta_{\text{к}}^{v+1} - \Theta_{\text{к}}^v &= \tau(a_{22}\Theta_{\text{к}} + b_2 G_{\text{к}}) \\ \frac{\Theta_{\text{п}}^{v+1} - \Theta_{\text{п}}^v}{\tau} &= a_{31}\Theta_{\text{ч}} + a_{32}\Theta_{\text{к}} + a_{33}\Theta_{\text{п}} \\ \Theta_{\text{п}}^{v+1} - \Theta_{\text{п}}^v &= \tau(a_{31}\Theta_{\text{ч}} + a_{32}\Theta_{\text{к}} + a_{33}\Theta_{\text{п}}) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Спряжена система в зворотному часі:

$$\begin{aligned}
\frac{\lambda_1^v - \lambda_1^{v-1}}{\tau} &= -q(0.054 \cdot \Theta_{\text{ч}} + \Theta_{\text{к}} - 0.232 \cdot \Theta_{\text{пш}}^{\text{зад}}) - \lambda_1 a_{11} - \lambda_3 a_{31}, \\
\lambda_1^v - \lambda_1^{v-1} &= \tau \left(-q(0.054 \cdot \Theta_{\text{ч}} + \Theta_{\text{к}} - 0.232 \cdot \Theta_{\text{пш}}^{\text{зад}}) - \lambda_1 a_{11} - \lambda_3 a_{31} \right), \\
\frac{\lambda_2^v - \lambda_2^{v-1}}{\tau} &= -q(0.059 \cdot \Theta_{\text{к}} + \Theta_{\text{ч}} - 0.768 \cdot \Theta_{\text{пш}}^{\text{зад}}) - \\
&\quad - \lambda_1 a_{12} - \lambda_2 a_{22} - \lambda_3 a_{32}, \\
\lambda_2^v - \lambda_2^{v-1} &= \tau \left(-q(0.059 \cdot \Theta_{\text{к}} + \Theta_{\text{ч}} - 0.768 \cdot \Theta_{\text{пш}}^{\text{зад}}) - \right. \\
&\quad \left. - \lambda_1 a_{12} - \lambda_2 a_{22} - \lambda_3 a_{32} \right), \\
\frac{\lambda_3^v - \lambda_3^{v-1}}{\tau} &= -\lambda_1 a_{13} - \lambda_3 a_{33}, \\
\lambda_3^v - \lambda_3^{v-1} &= \tau (-\lambda_1 a_{13} - \lambda_3 a_{33}).
\end{aligned} \tag{5.9}$$

5.4. Розрахунок оптимального програмного керування

Алгоритм оптимального програмного керування полягає в наступному:

1. Розраховуємо математичну модель в прямому часі при $U = \text{const}$.
2. Розраховуємо спряжену систему в зворотному часі.
3. Знаходимо оптимальне керування U .
4. Повертаємось до пункту 1, розраховуючи математичну траєкторію переходу. Записуємо похідну в часі як різницю і знаходимо попереднє значення.

Розрахунок оптимального програмного керування для нашого об'єкта виконано у програмному пакеті *MatLab*.

Ідентифікацію об'єкта було виконано у попередньому пункті.

Розраховуємо спряжену систему у зворотному часі у *MatLab*.

$A = [-0.396 \quad 0.4 \quad 0.00184; \quad 0 \quad -0.00116 \quad 0; \quad 0.0011$
 $0.00106 \quad -0.016]$

$B = [0 \quad 182 \quad 0]$

```

q=1
r=1
Tau=0.001
lam1(s-1)=lam1(s)-Tau*(-q(0.054*x10(s)+x20(s)-
23.2)-lam1*A[1,1]-lam2*A[3,1])
lam2(s-1)=lam2(s)-Tau*(-q(0.059*x20(s)+x10(s)-
76.8)-lam1*A[1,2]-lam2*A[2,2]-lam3*A[3,2])
lam3(s-1)=lam3(s)-Tau*(-lam1*A[1,3]-lam3*A[3,3])

```

Далі розрахуємо вектор оптимального керування:

$U(s) = -r \cdot b \cdot \text{lam2}(s)$;

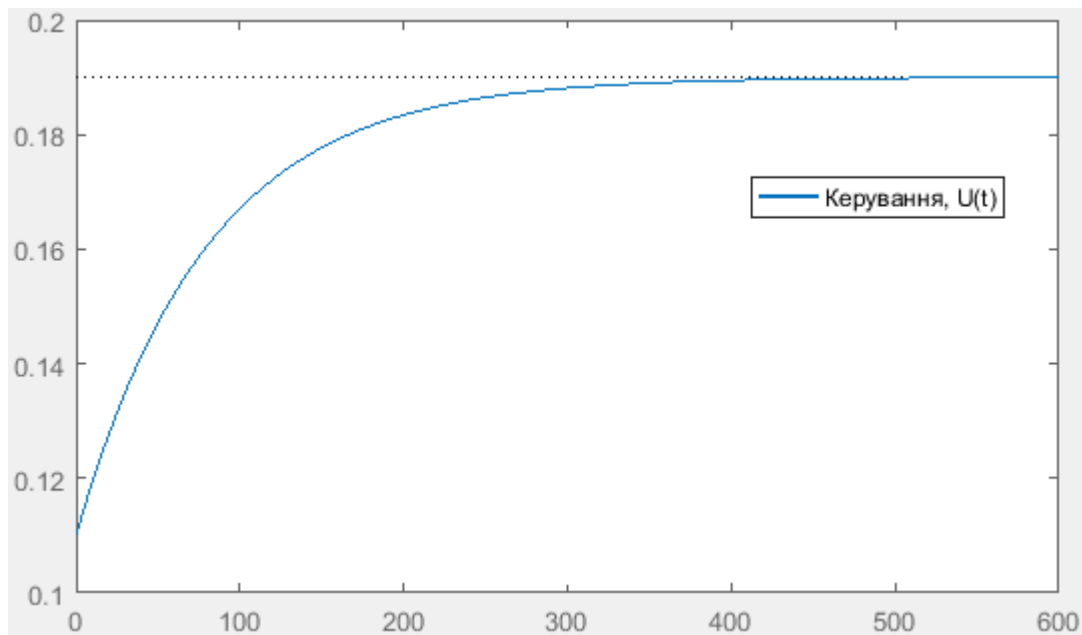


Рис.5.3. Вектор оптимального керування

5.5. Розрахунок оптимального керування зі зворотнім зв'язком

Розрахунок оптимального керування зі зворотнім зв'язком з інтегральною складовою виконано у *MatLab*.

Відмічено, що задачі синтезу оптимального в квадратичному значенні закону керування для лінійної системи, мають розв'язки в вигляді лінійних регуляторів. Такі регулятори дозволяють звести до нуля з плином

часу вплив на вихід об'єкту, при ненульових початкових умовах, чи короткострокових імпульсних впливах. Але у випадку постійних чи повільно мінливих вхідних впливів, такі регулятори не можуть забезпечити вимоги рівності нулю відхилень регулюючих величин від заданих значень. Для того, щоб вони задовольняли такій вимозі, закон керування повинен мати не одну, а дві складові, одна з котрих залежить від вектора стану, а друга – від інтеграла вектора стану. Якщо порівняти лінійний оптимальний регулятор з інтегральною складовою зі звичайним ПІ-регулятором, то результати моделювання свідчать про значні переваги оптимального [23].

Тому, бажано переформулювати постановку задачі синтезу таким чином, щоб у керуванні з'явилась інтегральна складова, яка знижує похибки керування. Одним способом є безпосереднє введення похідної сигналу керування в критерій якості:

$$I = \frac{1}{2} X(t_f)^T S X(t_f) + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} \left[X^T Q X + \left(\frac{dU}{dt} \right)^T R \frac{dU}{dt} + 2 X^T N \frac{dU}{dt} \right] dt \rightarrow \min. \quad (5.10)$$

При цьому необхідно продиференціювати рівняння динаміки і після заміни змінних перейти до критерію:

$$I = \frac{1}{2} [W^T S_1 W]_{t=t_f} + \frac{1}{2} \int_0^{t_f} [W^T Q_1 W + V^T R V + 2 W^T N V] dt \rightarrow \min. \quad (5.11)$$

Нижче наведений код *MatLab* для розрахунку оптимального лінійно-квадратичного регулятора з інтегральною складовою:

```
function Lin_reg_Int
disp('Матриця А:')
А = [-0.396  0.4  0.00184;  0  -0.00116  0;  0.0011
0.00106  -0.016]
% Введення матриці А
```

```

disp('Матриця B:')
B = [0 180 0] % Введення матриці B
% Параметри критерія якості:
disp('Матриця Q:')
Q = 1/20000*eye(2) % Формування одиничної
матриці
disp('Матриця R:')
R = 1 % Введення матриці R
disp('Матриця N:')
N = [] % Введення матриці N
disp('Вектор початкових умов X0:')
x0 = [98 96 120]' % Завдання вектора початкових
умов
disp('Вектор заданих значень відхилень Xd:')
xd = [10 10 10]' % Завдання вектора заданих
значень відхилень
disp('Вектор заданих значень відхилень керування
Ud:')
ud = 0.7 % Завдання відхилень значень керування
disp('Час спостереження tf:')
tf = 300 % Завдання часу спостереження
disp('Довжина кроку dt:')
dt = 0.01 % Завдання довжини кроку
disp('Кількість кроків n:')
n = tf/dt
disp('Матриця A1:')
A1 = [zeros(3) eye(3); zeros(3) A] % Формування
матриці A1
disp('Матриця B1:')

```

```

B1 = [zeros(3,1); B] % Формування матриці B1
disp('Матриця Q1:')
Q1 = [Q zeros(3); zeros(3) zeros(3)] %
Формування матриці Q1
[K P E] = lqr(A1,B1,Q1,R,N); % Синтез регулятора
disp('Матриця зворотнього зв'язку:'); K
disp('Розв'язок рівняння Ріккати:'); P
disp('Власні значення замкненої системи:'); E
% Визначення розмірності задачі
SA = size(A); SA = SA(1); SB = size(B); SB
=SB(3); SK = size(K); SK = SK(3);
% Формування векторів x, u та v
x = zeros(SA,n); u = zeros(SB,n-1); v
=zeros(SA,n);
% Формування початкового стану
x(:,1) = x0;
% Відокремлення пропорційної та інтегральної
частин матриці K
for i=SK/3:SK,
K2(i) = K(i);
end
for i=1:SK/3,
K1(i) = K(i);
K2(1) = [];
end
% Знаходження оптимального керування u та
змінних стану x
for i=1:n-1,
v(:,i) = v(:,i)+K1*x(:,i)*dt;

```



```

u(:,i) = ud-K2*(x(:,i)-xd)+v(i);
x(:,i+1) = (A*(x(:,i)-xd)+B*(u(:,i)-
ud))*dt+x(:,i);
end
% Побудова динаміки змінних стану
plot(0:dt:tf-dt,x), grid
title('Динаміка руху змінних стану');
xlabel('Час, t');
ylabel('Змінні стану, X(t)');
legend('x_1')
% Побудова вектора керування
figure(2)
plot(dt:dt:tf-dt,u), grid
title('Динаміка зміни керування');
xlabel('Час,t'); ylabel('Керування, U(t)');
legend('u')

```

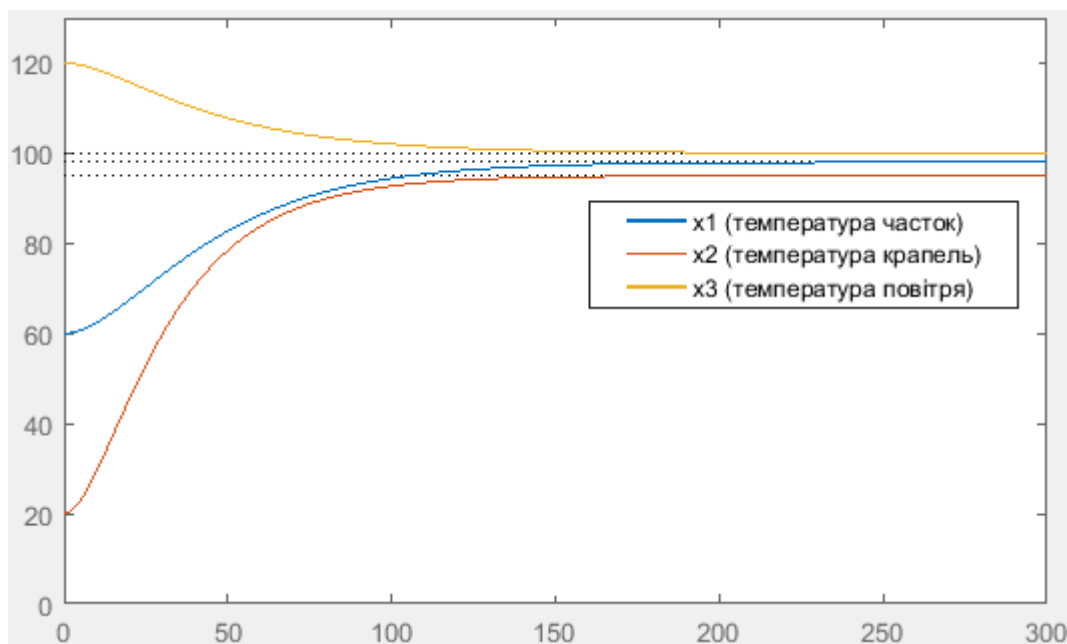


Рис. 5.4. Динаміка руху змінних стану з лінійно-квадратичним регулятором з інтегральною складовою

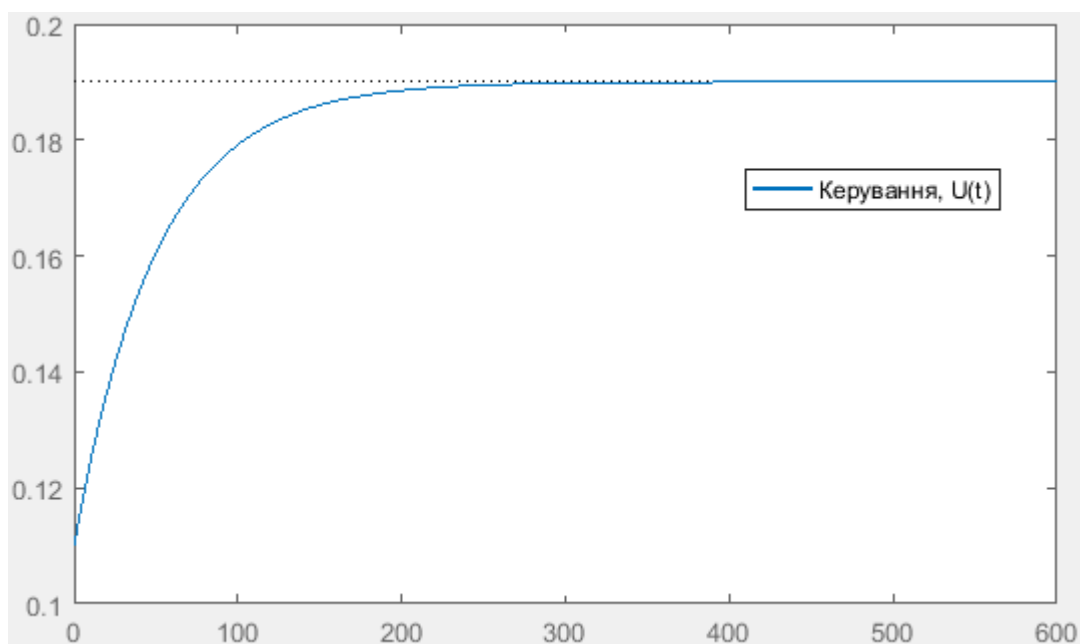


Рис.5.5. Динаміка руху керування з лінійно-квадратичним регулятором з інтегральною складовою

Результати розрахунку параметрів регулятора:

Матриця зворотнього зв'язку K:

K =

0.1733	0.3207	0.0258
--------	--------	--------

Розв'язок рівняння Ріккати P:

P =

1.0706	0.0377	0.5280
0.0377	0.0697	1.0007
1.0007	0.5280	0.0387

Власні значення замкненої системи E:

E =

-0.4845

-8.0406

-0.0389

5.6. Порівняння результатів отриманих для оптимального керування зі зворотнім зв'язком

З наведених вище графіків можна зробити висновок, що застосування лінійного-квадратичного регулятора для пошуку оптимального керування для системи зі зворотнім зв'язком покращує якість керування, збільшує швидкодію системи, точність регулювання. Окрім того, він більш універсальний для різних об'єктів, в тому числі й для тих, що суттєво змінюються в часі.

Розв'язок алгебраїчних рівнянь Ріккаті за допомогою стандартних функцій:

```
A = [-0.396  0.4  0.00184;  0  -0.00116  0;  0.0011
0.00106  -0.016]
; % Введення матриці A
B = [0 182 0]'; % Введення матриці B
Q = eye(3); % Введення матриці Q
R = 1 % Введення матриці R
N = [0 0]'; % Введення матриці N
E = eye(3); % Введення матриці E (в нашому
випадку I)
[P L G report] = care(A,B,Q,R,N,E) %Розв'язок
рівнянь Ріккаті
% P - розв'язок
% L - власні значення замкненої системи
% G - матричний коефіцієнт підсилення
% report - RR норма Фробеніуса відносних
залишків
R =
1
P =
```

```

1.0e+03 *
  1.0706    0.0377    0.5280
  0.0377    0.0697    1.0007
  1.0007    0.5280    0.0387
L =
  -1.9705
  -0.1336
  -
G =
  1.3832    20.4725 18.859
report =
  1.3364e-15

```

6. ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКОСТІ ГОТОВОГО ПРОДУКТУ

6.1. Застосування методу k-найближчих сусідів для розв'язання задачі прогнозування якості готового продукту

Методи класифікації поділяються на статистичні методи та методи машинного навчання.

До статистичних методів належать:

- баєсовська класифікація;
- ієрархічний метод;
- фасетний метод;
- дескрипторний метод.

До методів машинного навчання належать:

- дерева рішень;
- вирішальні правила;
- нейронні мережі;
- метод k найближчих сусідів.

Метод k найближчих сусідів – це метод рішення задач класифікації, що відносить об'єкти до класу, якому належить більшість з k його найближчих сусідів в багатовимірному просторі ознак. Це один з найпростіших алгоритмів навчання класифікаційних моделей. Число k - це кількість сусідніх об'єктів в просторі ознак, яке порівнюється з класифікованим об'єктом. Іншими словами, якщо $k = 10$, як у нашому випадку, то кожен об'єкт порівнюється з десятьма сусідами. Цей метод широко застосовується в технологіях Data Mining – глибинного аналізу даних для вирішення задач класифікації.

В процесі навчання алгоритм просто запам'ятовує всі вектори ознак і відповідні їм мітки класів. При роботі з реальними даними, тобто спостереженнями, експериментами, мітки класу яких невідомі, обчислюється відстань між вектором нового спостереження і тим, що був

запам'ятований раніше. Потім вибирається k найближчих до нього векторів, і новий об'єкт відноситься до класу, якому належить більшість з них.

Варто зауважити, що вибір параметра k суперечливий. З одного боку, збільшення його значення підвищує достовірність класифікації, але при цьому кордони між класами стають менш чіткими. На практиці хороші результати дають евристичні методи вибору параметра k , наприклад, перехресна перевірка.

Незважаючи на свою відносну алгоритмічну простоту, метод показує гарні результати. Головним його недоліком є висока обчислювальна трудомісткість, яка збільшується квадратично зі зростанням числа записів в наборі даних.

Використавши теоретичні засади методу k найближчих сусідів, можна розв'язати задачу прогнозування, яка дасть відповідь на питання: скільки відсотків готових гранул будуть малого, середнього та великого розмірів відповідно, в залежності від поточних значень керувальних параметрів – витрат повітря та розчину. Тобто, можна передбачити з певною точністю відсоток браку.

6.2. Реалізація задачі прогнозування

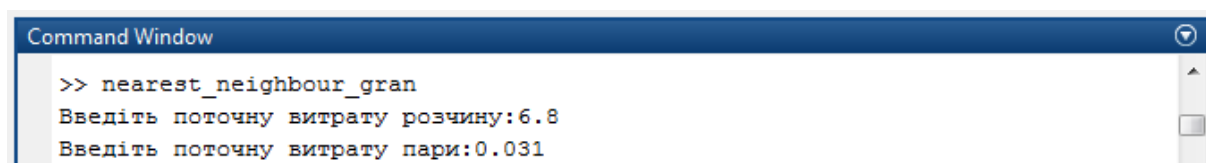
Для застосування методу, було використано узагальнені результати експериментальних досліджень проведених на навчальній установці зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі, а саме – масиви значень витрат розчину та повітря, та відповідні їм значення діаметрів гранул. Масиви експериментальних досліджень завантажуються у робочу область *Workspace* пакету прикладних програм *MatLab*. Для уточнення результатів завжди можна збільшити масиви експериментальних даних. Далі, за допомогою розробленої прикладної програми, що приймає на вхід

поточні значення витрат розчину та пари, відбувається обрахунок кількості готових гранул різного розміру (у відсотках).

Лістинг прикладної програми:

```
r = input('Введіть поточну витрату розчину:');
p = input('Введіть поточну витрату пари:');
ABC=['A';'A';'A';'A';'A';'A';'A';'A';'A';'A';'A';'A';
'A';'A';'A';'A';'B';'B';'B';'B';'B';'B';'B';'B';'B';
'B';'B';'B';'B';'B';'B';'B';'B';'B';'C';'C';'C';'C';
'C';'C';'C';'C';'C';'C';'C';'C';'C';'C';'C';'C'];
abc = cellstr(ABC);
x = [Gk Gp];
gscatter(x(:,1),x(:,2), abc, 'brk');
xlabel('Витрати розчину');
ylabel('Витрати повітря');
set(legend, 'location', 'best')
hold on
newpoint = [r p];
line(newpoint(1), newpoint(2), 'marker', 'p',
'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','y','markersi
ze',12,'linewidth',1)
[n,d] = knnsearch(x, newpoint, 'k', 10)
class = abc(n,1)
nearest_n = [x(n,1), x(n,2)]
line(x(n,1), x(n,2), 'color', [.5 .5 .5],
'marker', 'o', 'linestyle', 'none', 'markersize',10)
tabulate(abc(n))
```

Командне вікно після запуску програми виконує запит на введення з клавіатури поточних значень витрат.



```

Command Window
>> nearest_neighbour_gran
Введіть поточну витрату розчину:6.8
Введіть поточну витрату пари:0.031

```

Рис. 4.1. Запит прикладною програмою поточних значень витрат

Результат роботи програми:

Порядкові номери «найближчих сусідів»:

```

n =      1      5      12      28      29      19      26
50    42      47

```

Обраховані відстані до «найближчих сусідів»:

```

d =
      0      0      0      0
0  0.0020  0.0020  0.0300  0.0300  0.0400

```

class =

```

'M'
'S'
'M'
'M'
'S'
'V'
'V'
'V'
'M'
'V'

```

nearest_n =

```

6.8000  0.0310
6.8000  0.0310
6.8000  0.0310
6.8000  0.0310
6.8000  0.0310

```


6.8000	0.0330
6.8000	0.0330
6.7700	0.0315
6.8300	0.0321
6.7600	0.0303

Прогнозування розміру гранул при проточних значеннях витрат:

Value	Percent
M	40.00%
S	20.00%
V	40.00%

Графічна інтерпретація роботи прикладної програми представлена на рисунку 6.2.

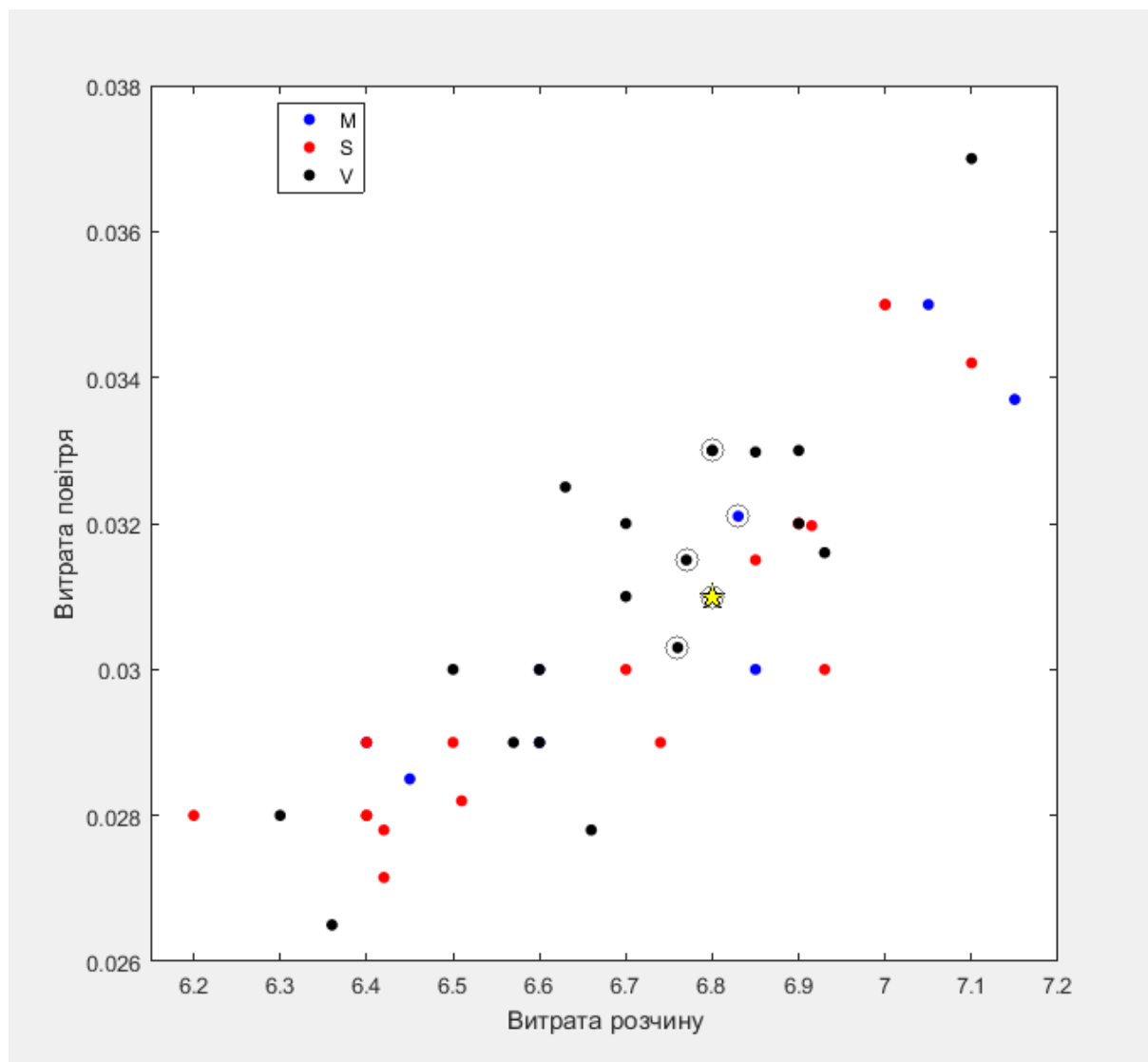


Рис. 6.2. Графічне відображення пошуку «найближчих сусідів»

7. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПЕРЕМІШУВАННЯМ У ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ»

7.1. Початок розробки, ідея, властивості, переваги

Ідея стартап-проекту: створення системи керування перемішуванням у псевдозрідженому шарі гранулятора.

Планується розробити та спроектувати керування перемішуванням у псевдозрідженому шарі гранулятора для покращення якості готового продукту. При проектуванні та дослідженні пропонується використовувати процес зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі.

Характеристики ринку. За останні десятиліття ринок демонстрував скромні темпи зростання, хоча після кризи в 2009 році він пережив значні зміни. Після них ринок став більш ефективним, покращилася кадрова ситуація на ньому, сформований потенціал для підйому на наступні роки. Прогнозується, що в подальші роки продажі будуть щорічно рости на 4% і, наприклад до кінця 2018 досягнуть \$ 8,7 млрд. Динаміка збільшення попиту на САПР в регіонах залежить від місцевої економічної ситуації. У країнах, де економіка знаходиться на підйомі (наприклад, Китай, США, Індія, Росія, Японія, Індонезія, Германія тощо), підвищуються обсяги виробництва, а значить і краще продаються системи та софт для автоматизації проектування.

Попит на обладнання, зокрема і системи автоматизації зростає і має перспективу подальшого зростання.

Основними споживчими сегментами на ринку промислової автоматизації є енергетика, нафтовидобувна галузь, вугільна промисловість, хімічна, нафтохімічна, харчова промисловість, галузь будівництва.

Досвід великих компаній на цьому ринку показує, що важливо мати можливість користуватися різними каналами розподілу – починаючи від прямого маркетингового каналу (без посередників), закінчуючи складними схемами, що включають окрім оптових та роздрібних посередників, також і функціональних. Але, на даному етапі, наша компанія розглядає для себе найпростішу схему каналів розподілу, оскільки на стадії первинного виробництва і впровадження товару дуже важливим є його супровід та технічна підтримка, що не може бути забезпечене посередниками.

Конкуренція на ринку промислової автоматизації суттєва, але основними конкурентними перевагами інших підприємств є відоме ім'я та великі обсяги виробництва, а нашою – інноваційність, принципово новий підхід, та «близькість» до споживача.

Цільова аудиторія, клієнт: сільськогосподарські компанії, приватні фермерські господарства, державний сектор агрокомплексу, приватні підприємства з виробництва мінеральних добрив та іншого гранулоподібного продукту.

Основна конкурентна перевага. При неповній структурній адекватності моделі та об'єкта, при впливі на об'єкт випадкових збурень, при великій відмінності в початкових значеннях параметрів моделі, що налаштовується від параметрів об'єкта можливе існування цілої множини екстремумів по параметрах, що налаштовуються. В цьому випадку працездатними лишаються саме пошукові системи ідентифікації з адаптивною моделлю.

У випадку з процесом зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі подібний підхід призведе до уточнення моделі об'єкта керування, а отже й до покращення системи керування і, як наслідок, значне покращення якості готового продукту і зменшення відсотку браку.

Фінансування. В першу чергу проект розрахований на державну підтримку, оскільки виробництво мінеральних добрив напряму пов'язано з підвищенням продуктивності сільського господарства, яке закладено у Стратегію сталого розвитку України на період до 2030 року.

Але, для підвищення вірогідності запуску проекту (отримання грошей на нього) необхідно мати декілька варіантів отримання грошей, що в подальшому можна взаємозамінювати або комбінувати. Наш проект розглядає наступні альтернативні шляхи отримання фінансування:

Кредитування. Сьогодні отримати кредит на стартап досить таки складно навіть при наявності майна для застави, поручителя і грамотно прорахованого бізнес-плану, адже банкіри найчастіше віддають перевагу співробітництву з працюючим бізнесом. Правда, шанс є, але треба подавати кредитні заявки відразу в кілька банків.

Краудфандінг («crowd funding», народне фінансування). Являє собою механізм фінансування стартапів «широкими масами». Збір коштів на оригінальну бізнес-ідею можна проводити на різних засадах: наприклад, пожертвування (без фінансової вигоди для спонсорів) або так званий «краудінвестінг» (ті інвестори, хто вклав гроші, отримують фінансову винагороду). Існують спеціальні web-спільноти, що забезпечують функціонування краудфандінга.

Бізнес-ангели. Це приватні інвестори, які вкладають свої власні кошти в основному в інноваційні стартапи. Крім безпосередньо грошей, вони також зможуть інвестувати в проекти свої зв'язки, досвід, технології в обмін на частку в бізнес-проект.

Венчурне підприємство (англ. Venture company) - підприємство малого бізнесу, що займається дослідно-конструкторськими розробками або іншими наукомісткими роботами, завдяки яким здійснюються ризиковані проекти. Венчур буває зовнішнім і внутрішнім. Внутрішній венчур можна організувати своїми силами і венчурним підприємцем.

Зовнішній венчур займається залученням коштів для здійснення ризикових проектів через пенсійні фонди, кошти страхових компаній, накопичення населення, кошти держави та інших інвесторів. На даний момент проект підпадає під зовнішній венчур [17, 22].

Товарний портфель (асортимент товарів та послуг).

Товар за задумом: покращення якості готового продукту – гранул, зокрема гранульованих мінеральних добрив; зменшення витрат енергетичних, матеріальних та людських ресурсів на виробництво.

Товар у реальному виконанні: системи керування перемішуванням у псевдозрідженому шарі.

Товар з підкріпленням: впровадження, обслуговування та супровід систем, навчання персоналу.

В часи переходу суспільства до інформаційного складається сприятлива обстановка до створення та розвитку інновацій на виробничому ринку, все це обумовлює зростання попиту на осучаснені засоби промислової автоматизації;

Промислове виробництво багатьох країн інтенсивно розвивається, виникає велика затребуваність нових, технічно складних засобів автоматизації, що дозволяють вирішувати серйозні системні завдання. Це свідчить про те, що попит на все більш досконалі системи автоматичного управління буде зростати;

Зростання цін на енергоносії, на оплату найманої праці викликає необхідність економії, а, отже, і застосування максимального рівня автоматизації, тому що саме автоматизація процесів дозволяє створити режим реальної економії.

Табл. 7.1. – Аналіз внутрішнього маркетингового середовища підприємства

Внутрішні	Вплив фактору	Симптоми
-----------	---------------	----------

фактори	Можливості	Загрози	проблеми/можливості
Проблеми стратегічного планування	Складність прогнозування, визначення цілей, завдань роботи компанії і методів їх досягнення		Проведення комплексних маркетингових досліджень, розробка стратегії діяльності компанії з урахуванням кризи
Високий інтелектуальний потенціал компанії		Кваліфіковані, лояльні і добре мотивовані працівники як інструмент для досягнення конкурентних переваг	Оптимізація управління трудовими ресурсами; розробка методів, спрямованих на підвищення продуктивності праці
Недостатній рівень фінансування	Поступовий фізичний знос устаткування		Внесення змін до фінансового плану компанії; пошук нових інвесторів
Інноваційність технології	Втрата потенційних клієнтів-консерваторів	Співпраця з клієнтами, орієнтованими на оновлене виробництво	Пошук клієнтів-новаторів Спроби приваблювати консерваторів доведенням якості систем

Табл. 7.2 – Узагальнююча таблиця результатів аналізу

№ п/п	Необхідна інформація
1	Комплексні маркетингові дослідження
2	Стратегії діяльності компанії з урахуванням кризи
3	Оптимізоване управління трудовими ресурсами
4	Методів, спрямовані на підвищення продуктивності праці
5	Нові інвестори для компанії
6	Пошук клієнтів-новаторів
7	Шляхи та методи приваблювання клієнтів-консерваторів
8	Способи просування, різноманітні презентацій компанії та товару

7.2. Аналіз зовнішнього маркетингового середовища

7.2.1. Аналіз факторів макромаркетингового середовища

Табл. 7.3 – Підсумкова таблиця факторів політико-правового середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Діяльність підприємства регулюється законодавчим и актами і законами	За допомогою ліцензування та сертифікації можна підвищувати якість реалізованих товарів і послуг.		Дотримання захисту прав споживачів, забезпечення безпеки праці, часу роботи, мінімальної заробітної плати

Наявність сільськогоспо дарського аспекту в Стратегії сталого розвитку України	Отримання державних інвестицій для впровадження технології		Пошуки каналів зв'язку з потрібними державними установами для отримання інвестицій
Спрямованість України до Європи	Розширення ринку збуту товару	Витіснення вітчизняного товару закордонним	Підведення товару компанії до вимог та стандартів Європейського середовища

Табл. 7.4. – Підсумкова таблиця факторів економічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Світова економічна криза		Недостатнє фінансування, відсутність інвесторів	Пошук шляхів здешевлення товару без компенсування цього за рахунок його якості
Падіння рівню промислового виробництва в країні		Мала кількість місць впровадження технології	Пошук закордонних клієнтів
Економічний		Недостатність	Вивід товару на

потенціал країни		клієнтів- підприємств, що можуть дозволити собі оновлення систем	закордонні ринки
---------------------	--	--	------------------

Табл. 7.5. – Підсумкова таблиця факторів науково-технічного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Інтенсивний розвиток НТП	Для того, щоб бути конкурентоспро- можним, підприємству необхідно відповідати все більш зростаючим вимогам до технології та обладнання.		Спостереження та впровадження технологій, що йдуть в ногу з часом
Поява нових інноваційних технологій керування та виробництва		Поява нових конкурентів	Постійний розвиток та вдосконалення товару, орієнтація на постійних клієнтів

Табл. 7.6 – Підсумкова таблиця факторів соціокультурного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Консервативний менталітет українських клієнтів		Вибір перевірених технологій перевірених виробників замість інноваційної	Демонстрація на практиці переважання якості товару за рахунок його інноваційності
Людський фактор, що виражається у бажанні позбавитися від зайвої роботи	Перевага над конкурентами за рівнем автоматизації, зниженням кількості людської праці		Вдосконалення елементів системи для зниження рівня людської праці

Табл. 7.7 – Підсумкова таблиця факторів природного середовища

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Спрямованість до енергозберігаючих та	Перевага над конкурентним товаром за рахунок		Пошук шляхів доведення та представлення переваг товару компанії над конкурентами

екологічно- безпечних технологій	малокомпонентно сті, енергоефективнос ті, екологічної безпеки		
--	---	--	--

7.2.2. Аналіз факторів мікроркетингового середовища

Табл. 7.8 – Підсумкова таблиця впливу споживачів

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Здатність покупців торгуватися		Втрата потенційних клієнтів через велику вартість товару та послуг	Співпраця з клієнтами на взаємовигідних умовах поступок
Бажання споживачів мати не тільки якісний, але й естетично гідний товар	Подолання конкурентів за рахунок унікального дизайну	Втрата клієнтів через невідповідність зовнішнього вигляду товару	Постійна робота над дизайном та ергономічністю товару
Орієнтація споживачів на певну торгівельну		Втрата потенційно важливих клієнтів	Робота над іміджем компанії, доведення слів ділом, підтвердження якості товару

марку			
-------	--	--	--

Табл. 7.9 – Підсумкова таблиця впливу конкурентів

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Суперництво між наявними конкурентами		Витіснення конкурентами компанії з ринку	Порівняння, аналіз товару конкурентів, запозичення гарних тенденцій та запобігання помилок конкурентів
Поява нових конкурентів		Рівень інноваційності нових конкурентів перевищить рівень інноваційності компанії	Моніторинг ринку, спроби технологічно випереджувати конкурентів
Поява товарів-замінників		Поява інноваційного промислового обладнання, що не потребує впровадження пропонованих систем	Робота над адаптивністю систем для впровадження на різні типи, види та рівні виробництва

Табл. 7.10 – Підсумкова таблиця впливу постачальників

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Здатність постачальників торгуватися	Домовленість на взаємовигідних умовах поступок	Втрата важливих постачальників	Дипломатичність у спілкуванні з постачальниками, при необхідності просування компаній-постачальників
Зменшення кількості можливих постачальників в умовах кризи		Втрата постійних постачальників	Наявність зв'язків з різними постачальниками, що можуть бути взаємозамінні

Табл. 7.11 – Підсумкова таблиця впливу контактних аудиторій

Фактори	Вплив фактору		Альтернативні шляхи вирішення проблеми чи реалізації можливості
	Можливості	Загрози	
Внутрішня контактна аудиторія підприємства	Підвищення продуктивності розробок за рахунок ефективної командної діяльності	Зниження продуктивності розробок за рахунок поганих відносин у колективі	Підвищення командного духу, проведення тимблдингів, корпоративів, пошук спільних інтересів

Засоби масової інформації	Просування власного бренду	Просування конкурентів, публікація неправдивої інформації	Просування власного бренду за рахунок взаємодії з різними видами ЗМІ
Професійно-технічні конференції, спільноти	Здобування підприємством «власного імені» у професійно-технічній спільноті		Співпраця з цими спільнотами, відвідування тематичних заходів, використання будь-якої можливості заявити про себе

7.3. Формулювання управлінської проблеми

Табл. 7.12 – SWOT-аналіз

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> - Високий інтелектуальний потенціал компанії - Інноваційність технології - Високий рівень енергозбереження та ресурсозбереження загалом - Адаптованість продукту суміжні ринки - Можливість виходу на закордонний ринок 	<ul style="list-style-type: none"> - Невідоме «ім'я» підприємства - Недостатній рівень фінансування - Висока конкуренція на ринку - Зменшення кількості можливих постачальників в умовах кризи
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> - Перевага над конкурентним товаром за рахунок 	<ul style="list-style-type: none"> - Поява інноваційного промислового обладнання, що не

<p>малокомпонентності, енергоефективності, екологічної безпеки....</p> <p>- Підвищення продуктивності розробок за рахунок ефективної командної діяльності</p> <p>- Подолання конкуренції за рахунок унікального дизайну систем</p> <p>- Плідна співпраця з постачальниками на взаємовигідних умовах поступок</p>	<p>потребує впровадження пропонованих систем</p> <p>- Витіснення конкурентами компанії з ринку</p> <p>- Недостатнє фінансування, відсутність інвесторів</p> <p>- Недостатність клієнтів-підприємств, що можуть дозволити собі оновлення систем</p> <p>- Витіснення вітчизняного товару закордонним</p>
--	--

7.4. Конкурентний аналіз

Табл. 7.13 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
<p>1. Тип конкуренції: Монополістична</p>	<p>Товар кожної фірми, яка торгує на ринку, є недосконалим замінником товару, який реалізують інші фірми.</p> <p>Диференціація товарів створює можливість обмеженого впливу на ринкові ціни, так як багато споживачів зберігають прихильність до конкретної марки і фірми навіть при</p>	<p>Компанія повинна робити ставку на основні відмінності своєї продукції (за якістю, економічністю, конкретними фізичними характеристиками).</p> <p>Велика кількість продавців виключає можливість змови, не дає особливо впливати на ринкові ціни.</p>

	деякому підвищенні цін.	
2. Рівень конкурентної боротьби: Національна - конкуренція між компаніями всередині країни	Менше компаній-конкурентів, за рахунок того, що іноземні компанії не конкурують з національними.	Першим кроком орієнтуватися та виходити на національний ринок, збирати зворотній зв'язок, проблеми та побажання. Охоплювати у співпраці максимальну кількість національних клієнтів, спілкуватися з ними особисто. Паралельно працювати над іміджем компанії.
3. За галузевою ознакою: Міжгалузева	Системи ідентифікації та керування можна використовувати для різногалузових виробництв та процесів (навіть у бізнес процесах), тощо.	Створення порівняно удосконалених систем, що можуть бути адаптованими до різногалузових клієнтів.
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Під час прийняття рішення про купівлю САК клієнт буде обирати кращу за властивостями, або за ступенем вдоволення певних потреб	Передбачення способів просування товару та демонстрації його переваг з урахуванням потреб та точок зору різних категорій клієнтів
5. За характером конкурентних переваг: цінова	За рахунок покращення з точки зору клієнта співвідношення ціна/якість підвищується конкурентоспроможність товару	Постійне спостереження та оцінка цінової політики на ринку. Регулювання ціни в комплексі з якістю товару. Просування товару методами, що використовують фактичні

		розрахунки переваг товару (у чисельному вигляді)
6. За інтенсивністю: марочна	Для вдалого просування, підвищення каналів збуту, кількості клієнтів та партнерів необхідно зарекомендувати себе, створити власне ім'я	Створення логотипу, нанесення його (або назви) на продукт. Реклама в Інтернеті. Збільшення кількості ділових контактів.

Табл. 7.14 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	«КОТРИС» (К), «КСК Автоматизація» (КСК), «Техінсервіс» (Т), «Спецмонтаж сервіс» (С)	Основні бар'єри входження на ринок: ефект масштабу великих компаній, недостатність інвестицій, обмежена можливість науково-дослідницьких та досвідно-конструкторських робіт	Існує загроза інтегрування постачальників в бізнес (відома подібна практика закордоном)	Цінова чутливість покупців. Прихильність до відомих брендів. Негативне ставлення до інновацій	Інші фірми виробляють схожу продукцію. Але на даний момент аналогів по показникам продуктивності немає

Висновки:	Основна перевага – досвід, відоме ім'я. Але, за рахунок інновацій, тісного контакту з клієнтом можна заробити імідж та отримати клієнтів.	Можливість входу на ринок існує. Потенційними конкурентами можуть стати схожі підприємства-новатори.	Постачальник и загалом не диктують умови. На даний момент існує велика низка можливих постачальників. Наш продукт є доволі адаптивним для видозмінених компонент.	Диктують умови на ринку: якщо співвідношення ціна/якість буде не співмірним, можуть відмовитися від продукту, оскільки є з чого вибрати	Мінімальне обмеження через товари-замінники.

Табл. 7.14 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/ п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Доступна ціна	За рахунок малокомпонентності системи – загальна вартість знижується
2.	Інноваційність технології	Впровадження стратегії інтенсифікації перемішування не було застосовано в цьому напрямку раніше
3.	Енерго- та ресурсозбереження	Завдяки підвищенню точності керування підвищується ефективність процесу. Це дозволяє отримувати більше якісного продукту з меншою витратою ресурсів

4.	Адаптованість продукту на суміжні ринки	Використання систем ідентифікації та керування такого виду можна адаптувати під різні галузі виробництва
5.	Можливість виходу на закордонний ринок	Інноваційність технології дозволяє впроваджувати ці системи не тільки на території України
6.	Малокомпонентність	Порівняно невелика кількість компонентів на відміну від систем відомих виробників.

Табл. 7.15 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін систем керування
перемішуванням

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бал и 1- 20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з «Ладієва і КО»						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Доступна ціна	18			К, Т	КС К	С		
2.	Інноваційність технології	20	Т, С	К	КС К				
3.	Енерго- та ресурсозбереження	15	Т	К, С	КС К				
4.	Адаптованість продукту на суміжні ринки	15			Т, С		К	КС К	
5.	Можливість виходу на закордонний ринок	10			Т, С			К	КС К
6.	Малокомпонентність	17	Т	С, К		КС К			

7.5. Ринкові стратегії стартап-проекту

Табл. 7.16 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входження у сегмент
1.	Приватні сільськогосподарські компанії	85%	75%	Конкуренція відносна. Попит залежить від розміру компанії та фінансового стану.	Спілкування на пряму з представниками підприємства дає більшу імовірність заробити прихильність у клієнта
2.	Державний сектор агрокомплексу	60%	45%	Достатня конкуренція, оскільки більшість конкурентів працюють на державному рівні	Є певна складність, оскільки компанія ще не має власного імені та позитивної репутації
Які цільові групи обрано: Для здобуття іміджу та репутації компанії починати треба з приватних сільськогосподарських компаній, а в подальшому розповсюджувати свою діяльність і на державному рівні					

Табл. 7.17 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/ п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Максимальне зниження ціни	Масовий маркетинг	Ідеальне для клієнта співвідношення ціна/якість	Стратегія лідерства по витратах
2.	Підписання довгострокових контрактів	Диференційований маркетинг	Супровід систем, їх технічне обслуговування, навчання персоналу	Стратегія диференціації

Табл. 7.18 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/ п	Чи є «першо прохідцем»?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Треба починати з клієнтів, не зациклених на відомому бренді, тих, хто готовий експериментувати.	Загальним для нашого товару і конкурентного є тільки основна ідея, а структура, компоненти, їх співвідношення є унікальними	Стратегія заняття конкурентної ніші

Табл. 7.19 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/ п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитк у	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап- проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	1. Аргументован а ціна. 2. Супроводжен ня товару 3. Необхідна якість	Стратегія диферен ціації	1. Продукція вищої якості за конкурентну 2. Можливість економити на ресурсах 3. Програми лояльності за тривалі контракти 4. Супровід товару	1. Висока якість та надійність. 2. Тривалі контракти. 3. Програми лояльності.

7.6. Продуктові (маркетингові) стратегії стартап-проекту

Табл. 7.20 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Висока актуальність систем ідентифікації та керування у різних	Збільшення чистого прибутку. Покращення якості продукту	- Високий інтелектуальний потенціал компанії - Інноваційність технології - Високий рівень енергозбереження та ресурсозбереження загалом - Адаптованість продукту суміжні ринки

	галузей		- Підвищення продуктивності процесу та якості товару
--	---------	--	--

Табл. 7.21 – Опис трьох рівнів моделі товару

Обрана альтернатива розвитку проекту	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	покращення якості готового продукту – гранул, зокрема гранульованих мінеральних добрив; зменшення витрат енергетичних, матеріальних та людських ресурсів на виробництво.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	м ²	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	и		
	Системи ідентифікації, керування, особливістю яких є стратегія керування перемішуванням. Надійність Малокомпонентність Енерго- та ресурсозбереження Доступна ціна Інноваційність технології	1x1,5	60 тис. грн Можна підключити на будь-якому зручному місці для обслуговуючого персоналу. Захищені від потрапляння води та інших речовин, електричноізолювані компоненти. U=360V; та U=220V. I=20mA;
Якість: відповідає Європейським нормам та ДСТУ. Тестування проводиться перед встановленням, а також на			

	місці.
	Пакування – картонне пакування із спеціальними захисними матеріалами всередині для уникання деформацій чи пошкодження
	Марка: «Ладієва і КО»
III. Товар із підкріпленням	<p>До продажу:</p> <ul style="list-style-type: none"> • програми лояльності при підписанні довготривалого контракту; • різні способи доставки; • різні способи оплати; • демонстрації та моделювання роботи
	<p>Після продажу:</p> <ul style="list-style-type: none"> • впровадження; • обслуговування; • супровід; • навчання персоналу; • гарантія повернення грошей і обміну товару.
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: буде розроблено патент на винахід, на кожному приладі буде акцизна марка та фірмовий штамп.	

Табл. 7.22 – Визначення меж встановлення ціни

№ п / п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари - аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
------------------	--------------------------------	--------------------------------	--	---

1.	25-40 тис. грн	немає	70-130 тис. грн	Верхня: 30 тис. грн Нижня: 23 тис. грн
----	----------------	-------	-----------------	---

Табл. 7.23 – Формування системи збуту

№ п/ п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієн тів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Клієнти хочуть на власні очі бачити систему та її тестування перед закупівлею, потребують доставки, впровадження, консультацій, супроводу	Гарантія Тестування Доставка Ремонт Допомога введення у експлуатацію Допомога при запуску	Нульовий рівень. Наша компанія сама встановлює і проектуює систем. До споживача доходить продукція з усіма необхідними компонентами.	Власна система збуту і домовленість про подальшу співпрацю

Табл. 7.24 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/ п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються	Ключові позиції, обрані для позиціонуван	Завдання рекламного повідомлен	Концепція рекламного звернення
-----------------------	--	---	---	---	---

		цільові клієнти	ня	ня	
1.	Орієнтован а на швидке та ефективне спілкування , бажано спеціалізова не	Спілкування як онлайн (сайти, соц.мережі) так і офлайн (зустрічі, телефонні розмови, виставки тощо). Друкована продукція (каталоги, спецвидання). Документальне оформлення домовленостей	Якість залежить від ціни; Тривале партнерство = лояльні ціни; Вчасно, ефективно і економно.	Ефективна демонстраці я переваг продукції залежно від напрямку зацікавлено сті клієнта	Офіційний стиль. Наочна демонстрація даних (розрахунки, графіки, діаграми). Призначення зустрічей.

ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації розглянуто процес зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. Роботу присвячено розв'язанню задачі проектування та дослідження системи керування режимом перемішування в грануляторі псевдозрідженого шару в процесі зневоднення та гранулювання із забезпеченням у ній коливань близьких до хаотичних. У науковій роботі було виконано дослідження гранулятора псевдозрідженого шару як ТОК, розроблено нову трифазну модель процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі, визначено статичні та динамічні характеристики процесу, проведено варіаційне дослідження математичної моделі процесу.

Також в процесі дослідження було створено експертну систему діагностування аварійних ситуацій в процесі зневоднення та гранулювання з рекомендаціями по їх усуненню. За допомогою даної системи можна швидко визначити відхилення технологічних параметрів, що призвели до аварійної ситуації. Окрім цього було розроблено програму прогнозування якості готового продукту – гранул сульфату амонію, що була побудована на даних експериментальних досліджень. Її застосування дозволяє з певною точністю передбачити відсоткове співвідношення готових гранул малого, середнього та великого розмірів на основі вхідних значень витрат. Було досліджено ступінь хаотичності системи та розроблено систему позиційного регулювання перемішування в грануляторі, яке дозволяє забезпечити пульсації у псевдозрідженому шарі без втрати системою стійкості та, відповідно покращити процес перемішування у шарі одним з найекономічніших шляхів.

Результати роботи можуть бути впроваджені в системи керування процесом, а експертна система – використана в курсах «Інтелектуальні системи управління» та «Технології штучного інтелекту».

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андриевский Б. Р. Управление хаосом: методы и приложения [Текст]: навч. посіб. // Б. Р. Андрієвський, А. Л. Фрадков. – К. Институт проблем машиноведения РАН, 2004. – 37 с. : іл. – Бібліогр.: с. 24–25. – 150 экз. – ISBN: 0-08-043560-2.
2. D. Gidaspow. Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions / Dimitri Gidaspow. – Academic Press, 1994. – 167 с. – Бібліогр.: с. 2-18, 150-155, 220-223. - ISBN: 0-12-282470-9.
3. Корнієнко Б. Я. Гранулювання у псевдозрідженому шарі. Дослідження детермінованого хаосу процесу [Текст] / Б. Я. Корнієнко, Л. Р. Ладієва, О. В. Снігур. – К.: Хім. пром-сть України, 2013. – №2. – С. 20-23. – Бібліогр.: 3 назв. – укр.
4. Корнієнко Б. Я. Ідентифікація процесу гранулювання мінеральних добрив у апараті з псевдозрідженим шаром [Електронний ресурс] / К.: Наукоємні технології, 2013. – № 3. – С. 280-284. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nt_2013_3_8.
5. Верисокин А. Ю. Определение показателей Ляпунова на примере модели Селькова в присутствии внешней периодической силы. Спектральный анализ и его приложения [Текст] / А. Ю. Верисокин. – Москва, Мир, 1990. – 584 стр. – Бібліогр.: с. 345. – пер. з англ..
6. Сергеев И. Н. Исследования по теории показателей Ляпунова [Текст] / Научная школа В.М. Миллионщикова: И.Н. Сергеев, А.Н. Ветохин, В.В. Быков. – М.: Кафедра дифференциальных уравнений Механико-математический факультет Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова – 32 с. - Бібліогр.: в кінці
7. Спосіб автоматичного керування процесом зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі. [Текст]: пат. України : / Борзенкова С. В., Ладієва Л. Р. № u201712494 / заявл. 25.12.2006; - 4 с.

8. Борзенкова С. В. Система автоматичного керування гранулятором псевдозрідженого шару (НУХТ – 2016): матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (23 листопада 2016 р.) [Електронний ресурс] / Борзенкова С. В., Ладієва Л. Р. – К: НУХТ, 2016 р. – 287 с. — Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>

9. Борзенкова С. В. Методи оптимізації роботи гранулятора (АКІТ-2017): матеріали Четвертої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (19–20 квітня 2017 р., м. Київ)/ Борзенкова С. В., Ладієва Л. Р. – К.: НТУУ «КПІ», 2017 р. – 204 с. : іл. – Бібліогр.: в кінці тез. – 60 пр.

10. Борзенкова С. В. Аналітична модель зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі (НУХТ – 2017): матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (22 листопада 2017 р.) [Електронний ресурс] / Борзенкова С. В., Ладієва Л. Р. – К: НУХТ, 2017 р. – 297 с. — Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>

11. Борзенкова С. В. Автоматизація процесу зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі (АКІТ – 2017): матеріали одинадцятої науково-практичної конференції студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (7 грудня 2017 р.) [Електронний ресурс] / Борзенкова С. В., Ладієва Л. Р. – К.: НТУУ «КПІ», 2017 р.

12. Классен П. В. Основы техники гранулирования [Текст]: навч. Посіб. / П. В. Классен, И. Г. Гришаев. – М.: «Химия», 1982. – 272 с. : іл. – Бібліогр.: с. 265–267. – 200 пр.

13. Корнієнко Я. М. Кінетика процесу гранулоутворення комплексних мінерально-гумінових добрив/ Я. М. Корнієнко, А. Р.

Степанюк, П. М. Магазій, Б. Я. Корнієнко, Я. М. Заграй // Екологія довкілля та безпека життєдіяльн. - 2007. - № 5. - С. 73-78. - Бібліогр.: 4.

14. Моделювання і оптимальне керування процесами зневоднення та гранулювання у псевдозрідженому шарі : Автореф. дис... канд. техн. наук : 05.13.07 / Б. Я. Корнієнко; Нац. техн. ун-т України «КПІ». - К., 2000. - 18 .

15. Ротач В. Я. Теория автоматического управления [Текст]: учеб. для студ. вузов / В. Я. Ротач. – Москва: Изд. МЭИ, 2004. – 400 с. – Библиогр.: с. 394. – ISBN 978-5-903072-69-9.

16. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації [Текст]: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямком «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 236 с. : іл. – Бібліограф.: с. 150–162. – 200 пр. – ISBN 978-966-622-287-2.

17. Вікіпедія – вільна енциклопедія [Електронний ресурс] // <http://ua.wikipedia.org>

18. A Numerical Model of Gas-Fluidized Beds / J. A. M. Kuipers, K. J. van Duin, F. P. H. van Beckum, W. P. M. van Swaaij // Chem. Eng. Sei. – 1992.

19. May W. G. Fluidized-Bed Reactor Studies / W. G. May // Chem. eng. progress. – 1959. – 55, No. 12. – P. 49-56.

20. Ярошук Л. Д. Технології штучного інтелекту – 2. Інтелектуальні системи управління та Експертні методи в автоматизованих системах управління – 2. Спеціальні розділи автоматизації хімічних виробництв: Формування баз знань для створення експертних та нечітких систем: Метод. вказівки до викон. розрахункових робіт для студ. спеціальності «Автоматизоване управління технологічними процесами» / Уклад.: Л. Д. Ярошук. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 60 С.

21. Корнієнко Я. М., Сачок Р. В. Процеси переносу в дисперсних системах : Навч. посіб. [Електронний ресурс]. 132 с.: іл. Режим доступу: вільний

22. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

23. Жученко А. І., Ладієва Л. Р., Дубік Р. М. Динамічна оптимізація з використанням MATLAB та SIMULINK. – К.: НТУУ “КПІ”, 2010. – 209 с.